Посвящается Грегори:
грядут перемены — пусть тебе хватит мудрости
и мужества приспособиться к ним

The Story Of
EARTH

The First 4.5 Billion Years,
from Stardust to Living Planet

ROBERT M. HAZEN

PENGUIN BOOKS

История ЗЕМЛИ

От звездной пыли — к живой планете
Первые 4 500 000 000 лет

РОБЕРТ ХЕЙЗЕН

Перевод с английского

Династия
АНФ

Москва
2019

УДК 523.3+557.1
ББК 26.0
Х35

Переводчик Тамара Казакова
Редактор Антон Никольский
Научный консультант Владимир Сурдин, к. ф.-м. н.
Научный консультант Николай Короновский, д. г.-м. н.

Хейзен Р.

Х35 История Земли: От звездной пыли — к живой планете: Первые 4 500 000 000 лет / Роберт Хейзен ; Пер. с англ. — М.: Альпина нонфикшн, 2019. — 346 с.

ISBN 978-5-91671-365-7

Книга известного популяризатора науки, профессора Роберта Хейзена, знакомит нас с принципиально новым подходом к изучению Земли, в котором переплетаются история зарождения и развития жизни на нашей планете и история образования минералов. Прекрасный рассказчик, Хейзен с первых строк увлекает читателя динамичным повествованием о совместном и взаимозависимом развитии живой и неживой природы. Вместе с автором читатель затаив дыхание совершает путешествие сквозь миллиарды лет: возникновение Вселенной, появление первых химических элементов, звезд, Солнечной системы и, наконец, образование и подробная история Земли. Движение целых континентов через тысячи километров, взлет и падение огромных горных хребтов, уничтожение тысяч видов земной жизни и полная смена ландшафтов под воздействием метеоритов и вулканических извержений — реальность оказывается гораздо интересней любого мифа. Воображение астробиолога, методология историка и острый глаз натуралиста помогают автору изумительно ясно описывать самые сложные вопросы науки. Однако Хейзен не останавливается на нашем времени, основываясь на последних научных открытиях, — он дает читателю захватывающую возможность заглянуть в будущее.

УДК 523.3+557.1
ББК 26.0

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу lib@alpina.ru.

© Robert M. Hazen, 2012
© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2019

ISBN 978-5-91671-365-7 (рус.)
ISBN 978-0-14-312364-4 (англ.)

Династия

Фонд некоммерческих программ

«Династия»

основан в 2002 г.

Дмитрием Борисовичем Зиминым,

почетным президентом компании «Вымпелком».

Приоритетные направления деятельности Фонда —

поддержка фундаментальной науки и образования в России,

популяризация науки и просвещение.

В рамках программы по популяризации науки

Фондом запущено несколько проектов.

В их числе — сайт elementy.ru, ставший одним

из ведущих в русскоязычном Интернете тематических ресурсов,

а также проект «Библиотека «Династии» —

издание современных научно-популярных книг,

тщательно отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках, выпущена

в рамках этого проекта.

Более подробную информацию о Фонде «Династия»

вы найдете по адресу

www.dynastyfdn.ru.

Содержание

Введение 11

1 Рождение *Образование Земли* 19

2 Мощный удар *Образование Луны* 47

3 Черная Земля *Первичная базальтовая кора* 71

4 Голубая Земля *Образование океанов* 97

5 Серая Земля *Первичная гранитная кора* 125

6 Живая Земля *Происхождение жизни* 153

7 Красная Земля *Фотосинтез и Великое кислородное событие* 185

8 «Скучный» миллиард *Минеральная революция* 217

9 Белая Земля *Цикл Земля — снежный шар — Земля-парник* 245

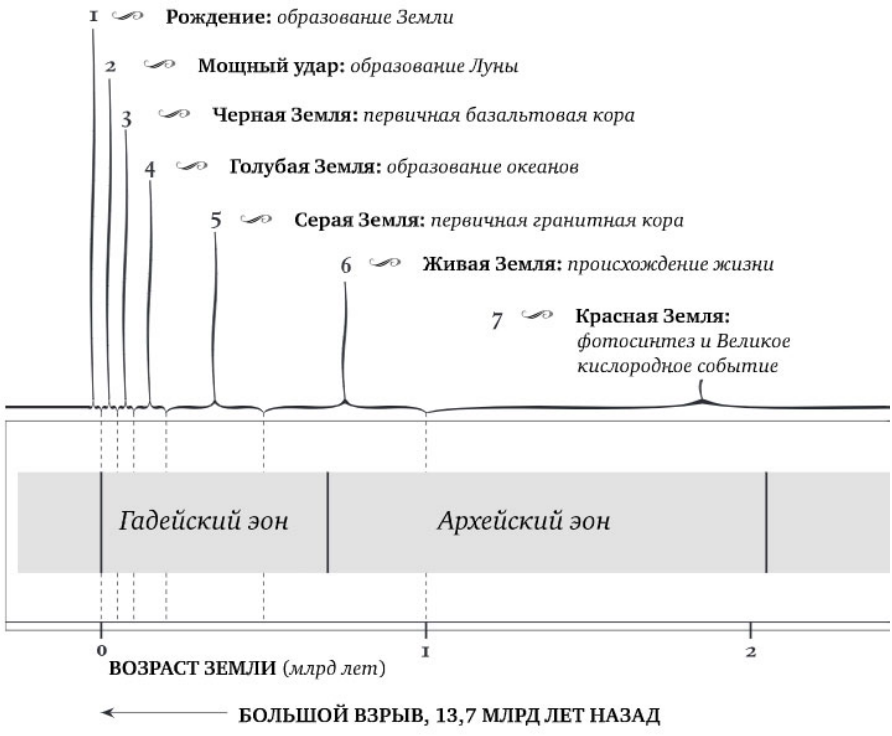
10 Зеленая Земля *Развитие земной биосферы* 275

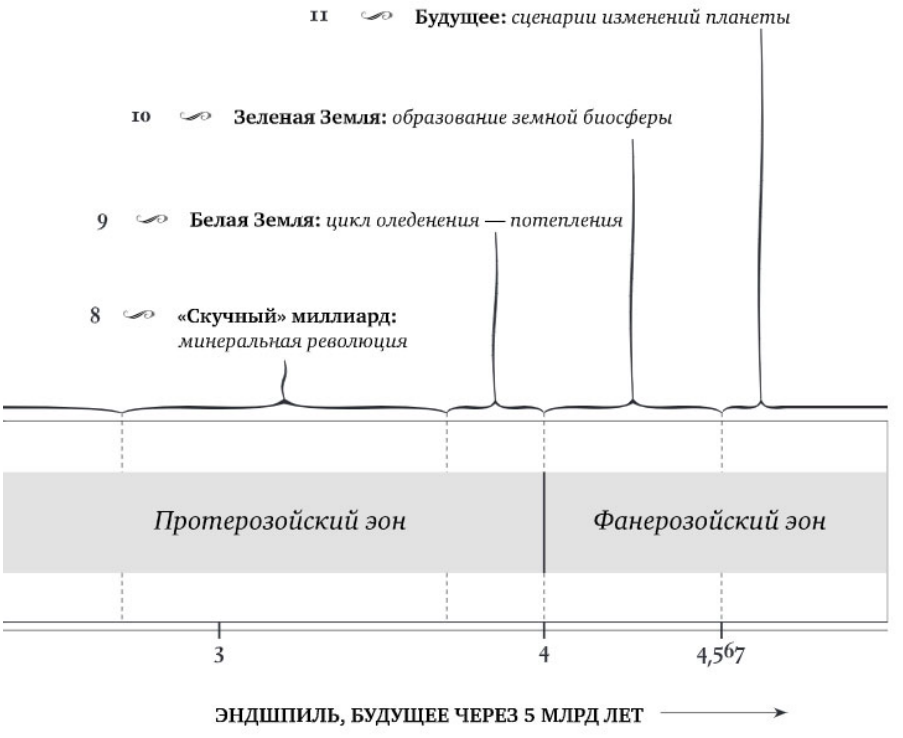
11 Будущее *Сценарии будущих изменений Земли* 303

Эпилог 331

Благодарности 334

Предметный указатель 337


1 Рождение: образование Земли
2 Мощный удар: образование Луны
3 Черная Земля: первичная базальтовая кора
4 Голубая Земля: образование океанов
5 Серая Земля: первичная гранитная кора
6 Живая Земля: происхождение жизни
7 Красная Земля: фотосинтез и Великое кислородное событие
Гадейский эон
Архейский эон
0
1
2
ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ (млрд лет)
БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ, 13,7 МЛРД ЛЕТ НАЗАД


11 Будущее: сценарии изменений планеты
10 Зеленая Земля: образование земной биосферы
9 Белая Земля: цикл оледенения — потепления
8 «Скучный» миллиард: минеральная революция
Протерозойский эон
Фанерозойский эон
3
4
4,567
ЭНДШПИЛЬ, БУДУЩЕЕ ЧЕРЕЗ 5 МЛРД ЛЕТ

Введение

Одно из самых захватывающих изображений, сделанных в XX в., — фотография восхода Земли, снятая космонавтом с лунной орбиты в 1968 г. Мы всегда знали, как уникален и прекрасен наш мир: Земля — единственная известная планета с океанами, насыщенной кислородом атмосферой и жизнью. Тем не менее многие оказались не готовы к столь потрясающему контрасту между крайне враждебным человеку ландшафтом Луны, безжизненным мраком космической бездны и привлекательностью нашей бело-голубой планеты. С той удаленной точки, дающей хороший обзор, Земля выглядит маленькой, одинокой и уязвимой — и вместе с тем более прекрасной, чем все остальные небесные тела.

Мы с полным основанием можем восхищаться нашей родной планетой. Более чем за два столетия до Рождества Христова греческий ученый-энциклопедист Эратосфен Киренский провел первое в мире документально подтвержденное исследование планеты Земля. Чтобы измерить окружность Земли, он применил простой и остроумный способ, основанный на наблюдении за тенями. В египетском городе Сиене (ныне Асуан) во время летнего солнцестояния он в полдень наблюдал за солнцем, которое располагалось в зените. Вертикальный столбик не отбрасывал никакой тени. В другом конце Египта, в тот же самый день и тот же час, в приморском городе Александрия, примерно в 840 км севернее, точно такой же столбик отбрасывал короткую тень, указывая на то, что в этой местности солнце находилось не прямо над головой. Применив теоремы своего великого предшественника Эвклида, Эратосфен пришел к выводу, что Земля должна иметь форму шара, и вычислил, что окружность этого шара составляет примерно 40 225 км — результат, поразительно близкий к современ-

ным данным, согласно которым в районе экватора Земля имеет в окружности 40 075 км.

На протяжении тысячелетий великое множество других ученых, от большинства из которых не сохранилось даже имен, исследовали и познавали нашу родную планету. Они выясняли, как образовалась Земля, как она движется в пространстве, из чего она состоит и как устроена. При этом самый главный вопрос, волновавший всех людей науки, заключался в том, как Земля развивалась и как на ней возникла жизнь. В наши дни благодаря накопленному поколениями опыту и возможностям современных технологий нам известно о Земле гораздо больше, чем могли даже вообразить ученые прошлого. Разумеется, и мы не знаем всего, но все же наши познания о Земле значительно обогатились.

По мере расширения и углубления знаний о Земле, превратившихся за тысячелетия в устойчивые представления, становилось все очевиднее, что история Земли — это история изменений.

Многие данные указывают на то, что Земля меняется год за годом, век за веком. Ритмические осадочные толщи, или варвиты, найденные в некоторых ледниковых озерах Скандинавии, запечатлели более чем тринадцатитысячелетнюю историю непрерывного накопления сезонных слойков, отличающихся друг от друга размерами слагающих их зерен — тонкозернистый осадок сменялся грубозернистым вследствие ежегодной активизации эрозии во время весеннего таяния. В результате бурения ледников в Антарктиде и Гренландии получены данные о сезонных отложениях льда за более чем восемьсот тысячелетий. В Вайоминге, в сланцах Грин-Ривер, обнаружены тончайшие, толщиной с бумажный лист, слои осадочных отложений, запечатлевшие геологические события, происходившие в течение более миллиона лет. Все эти отложения покоятся на гораздо более древних породах, которые в свою очередь несут следы грандиозных циклов преобразований.

Исследование длительных геологических процессов указывает на еще более масштабные события в истории Земли. Обра-

зование Гавайских островов произошло в результате нечастой, но регулярной вулканической активности, когда слои лавы последовательно накладывались друг на друга в течение десятков миллионов лет. Сглаженные очертания Аппалачей и других древних горных массивов объясняются постепенной эрозией, происходившей в течение сотен миллионов лет, прерываемой время от времени грандиозными оползнями. Внезапные сдвиги тектонических плит смещали целые континенты, воздвигали горы и создавали океаны на протяжении всей геологической истории.

Земля всегда была беспокойной, постоянно развивающейся планетой. Все в ней, от ядра до коры, непрерывно меняется. Даже в наше время и атмосфера, и океаны, и суша подвержены изменениям, хотя, возможно, и не таким интенсивным по сравнению с относительно недавним прошлым. Нелепо было бы не обращать внимания на тревожные признаки таких изменений, и вряд ли мы совершим такую глупость — ведь наш интерес к родной планете так же естествен, как в свое время для Эратосфена. Однако не меньшей глупостью было бы сосредоточиться на текущем состоянии Земли, не используя в полной мере возможность узнать как можно больше об ее удивительном прошлом, изменчивом и непредсказуемом настоящем, а также о нашей собственной роли и месте в ее будущем.

Большая часть моей жизни ушла на изучение нашей живой, сложной, изменчивой планеты. В детстве я собирал камни и минералы, загромождая комнату образцами кристаллов и окаменелостей вперемешку с букашками и костями. Вся моя профессиональная деятельность также отмечена этой одержимостью Землей. Я начал с исследований таких объектов, которые невозможно разглядеть даже в микроскоп, размером с атом, — пытался выявлять молекулярное строение породообразующих минералов, нагревая и сдавливая малюсенькие зерна минералов, чтобы воспроизвести условия «скороварки» в недрах Земли.

Со временем мой интерес сместился в сторону более масштабных геологических событий в пространстве и времени.

В десятках разных мест: от пустынь Северной Африки до ледяных просторов Гренландии, от Гавайских островов до высочайших вершин Скалистых гор, от Большого Барьерного рифа у берегов Австралии до древних окаменелых коралловых рифов — природные библиотеки Земли раскрывали передо мной многие миллиарды лет эволюции земных стихий, полезных ископаемых, горных пород и самой жизни. По мере того как мои исследования распространялись на изучение роли минералов в геохимической предыстории происхождения жизни, мне стала открываться взаимосвязь эволюции жизни и минералов на протяжении всей истории Земли — даже более поразительная, чем можно было ожидать; выяснилось, что не только некоторые горные породы возникли в результате жизнедеятельности организмов (что хорошо видно в известняковых пещерах на всех континентах), но и сама жизнь, по всей вероятности, возникла на основе горных пород. За более чем четыре миллиарда лет истории Земли эволюционное развитие минералов и жизни на планете (геология и биология) удивительно переплелись, но только в последнее время эта взаимосвязь привлекла пристальное внимание науки. В 2008 г. эти мысли нашли выражение в провокационной статье в «Эволюция минералов» (Mineral Evolution). У некоторых ученых новые неоднозначные аргументы вызвали одобрение: они расценили, что это открытие способно впервые за последние два столетия поколебать всю систему знаний о минералах, тогда как остальные отнеслись к публикации весьма настороженно, как к еретическому пересмотру основ нашей науки в контексте геологического времени.

Древняя наука минералогия, играющая первостепенную роль во всем, что касается Земли и ее прошлого, отличается, как это ни странно, удивительной статикой и отчужденностью от колебаний научной мысли в целом. Вот уже более двухсот лет минералоги занимаются исключительно исследованием химического состава, плотности, твердости, оптических свойств и кристаллической структуры. Посетите любой естественно-исторический музей — и вы поймете, о чем я говорю: в сте-

клянных шкафах покоятся великолепные образцы кристаллов, снабженные этикетками, на которых указано название, химическая формула, кристаллическое строение и местонахождение. У этих ценнейших фрагментов Земли богатое историческое прошлое, но вряд ли вы сможете найти какие-либо указания на возраст их образования и последующие геологические преобразования. Традиционный подход разлучает сами минералы с увлекательной историей их бытия.

Эта традиция нуждается в пересмотре. Чем больше мы узнаем о богатейшем прошлом горных пород Земли, тем очевиднее становится тот факт, что вся природа, живая и неживая, претерпевала все новые и новые изменения. Растущее понимание двух реальных категорий, присущих нашей планете, — времени и эволюционных изменений позволяет предположить не только то, как именно появились первые минералы, но и когда это произошло. А недавнее открытие живых организмов в среде, которая традиционно считалась непригодной для жизни, в раскаленных жерлах вулканов, кислотных озерах, арктических льдах и стратосферной пыли — превращает минералогию в ключевую науку среди всех других, которые ищут разгадку происхождения и сохранения жизни на планете. В ноябрьском 2008 г. выпуске ведущего минералогического журнала *American Mineralogist* мы с коллегами опубликовали статью, в которой сформулировали новый подход к минералогическим исследованиям — с учетом невероятных преобразований минералов на неизученном отрезке времени. Мы подчеркнули, что много миллиардов лет назад минералов нигде в космосе вообще не существовало. Никакие кристаллические соединения не могли образоваться и тем более сохраниться в беспредельно раскаленном вихре Большого взрыва. Понадобилось около полумиллиона лет, чтобы в гигантском котле творения мира образовались первые атомы — водорода, гелия и мизерное количество лития. Еще много миллионов лет спустя под воздействием сил гравитации эти первичные газообразные образования сгустились в туманности, которые затем распались на раскаленные плотные ослепительные звезды. И только

когда эти первые звезды, взорвавшись, образовали сверхновые звезды, остывающие сгустки газа, содержащего множество элементов, распались на мелкие кристаллики алмазов — и началась космическая сага минералов.

Вот так я превратился в исследователя, одержимого свидетельскими показаниями горных пород, ибо, сколь бы ни были эти свидетельства отрывочными и неопределенными, только они способны поведать историю своего рождения и смерти, остановки и движения, происхождения и развития. Эта никем еще не рассказанная, длинная и многогранная история органических и неорганических образований на Земле, взаимосвязанной эволюции живой и неживой природы поражает воображение. И мы должны услышать ее, поскольку мы сами — это тоже Земля. Все, что обеспечивает нам укрытие и средства к существованию, все то, чем мы владеем, поистине каждый атом и молекула нашей телесной оболочки — все это приходит от Земли и возвращается в Землю. Познать нашу планету означает познать частицу самих себя.

Исследовать историю Земли необходимо еще и потому, что сегодня ее водные ресурсы и атмосфера меняются со скоростью, невиданной за все предыдущие периоды ее существования. Уровень океанов повышается, они сильнее нагреваются и быстрее окисляются. В планетарном масштабе меняется характер осадков, атмосфера становится все более неспокойной. Тают полярные льды, оттаивает тундра, во многих местах изменяется среда обитания. Как нам предстоит узнать, история Земли — это история эволюции, причем в тех редких случаях, когда скорость изменений становилась опасно высокой, живая природа на Земле расплачивалась тяжкими последствиями. Для того чтобы принять обдуманные и своевременные меры во имя собственного будущего, необходимо как можно точнее представлять себе историю нашей планеты. Ибо, как подсказывает нам удивительный снимок Земли, сделанный с расстояния 384 400 км от нее, другого дома в ближнем космосе у нас нет.

Вслед за Эратосфеном и тысячами других пытливых умов я намерен в этой книге поведать историю Земли как дли-

тельный процесс изменений. Какой бы понятной и знакомой ни казалась нам наша планета, ее бурное прошлое изобилует такими невероятными событиями, что их даже трудно вообразить. Чтобы лучше узнать свой планетарный дом и постичь бесконечные эпохи, сформировавшие его, нам необходимо прежде всего осознать семь фундаментальных истин.

1. Земля состоит из циклического круговорота атомов.
2. Земля несравнимо древнее истории человека.
3. Земля трехмерна, и большинство процессов скрыто от глаз.
4. Горные породы — это летопись истории Земли.
5. Земные структуры: горные породы, океаны, атмосфера, живая природа — тесно взаимосвязаны.
6. История Земли включает длительные периоды застоя, прерываемые внезапными и необратимыми событиями.
7. Жизнь изменила и продолжает изменять поверхность Земли.

Эти представления о существовании Земли позволяют воспроизвести сложный, причудливый и многослойный узор взаимодействия атомов, минералов, горных пород и жизни на протяжении громадных отрезков времени и пространства; мы будем обращаться к ним на последующих страницах, повествуя о фазах развития планеты от первоначального огненного вихря Вселенной до длительной эволюции планеты Земля. Взаимосвязанная эволюция Земли и жизни — новое направление, лежащее в основе этой книги, — часть необратимой последовательности ступеней эволюции, восходящей к Большому взрыву. Для каждой стадии характерны свои процессы и феномены, которые постоянно преобразуют поверхность нашей планеты, неуклонно прокладывая путь к тому удивительному миру, в котором мы живем. Такова история Земли.

Глава 1

Рождение

Образование Земли

Миллиарды лет до рождения Земли

Первоначально не существовало ни Земли, ни Солнца, которое согревает ее. Наша Солнечная система, в центре которой располагается сияющая звезда и в которую входят различные планеты со своими спутниками, в космосе появилась сравнительно недавно — всего каких-нибудь 4,567 млрд лет назад. До того как наш мир возник из небытия, произошло многое.

Место для рождения нашей планеты было подготовлено гораздо раньше, в начале начал — в момент Большого взрыва — около 13,7 млрд лет назад, согласно новейшим данным. Этот миг творения мира остается самым смутным, непостижимым и самым решающим событием в истории Вселенной. Он представляется как сингулярность — превращение из ничего в нечто и не поддается объяснению с помощью законов современной физики или логики математики. Если вы склонны искать признаки существования Бога-Творца в космосе, стоит начать поиски с Большого взрыва.

В самом начале пространство, энергия и материя возникли из непостижимой пустоты. Из ничего. Затем появилось нечто. Мы не способны подобрать метафору к этому событию. Наша

Вселенная появилась даже не из вакуума, поскольку до Большого взрыва не было ни пространства, ни времени. Понятие «ничто» подразумевает пустоту — но до Большого взрыва не существовало ничего, в чем могла бы существовать пустота.

Затем в мгновение ока появилось не просто нечто, а все, чему предстояло существовать, и все сразу. В этот момент объем Вселенной был меньше ядра атома. Сверхплотный космос появился в виде чистой однородной энергии, и никакие частицы не нарушали его абсолютное единообразие. Вселенная начала стремительно расширяться, однако не во внешнее пространство (у нашей Вселенной не существует внешнего пространства). Ее объем, все еще состоящий из раскаленной энергии, ширился и увеличивался. По мере расширения Вселенная-энергия остывала. Первые субатомные частицы появились в считаные доли секунды после Большого взрыва — это были электроны и кварки, невидимая субстанция всех твердых, жидких и газообразных элементов, составивших наш мир и порожденных чистой энергией. Вскоре после этого, в течение все тех же долей космической секунды, кварки объединились в пары и триплеты, формируя более крупные частицы, включая протоны и нейтроны, входящие в ядро атома. Все эти структуры оставались предельно раскаленными около полумиллиона лет, пока продолжающееся расширение Вселенной не остудило космос до нескольких тысяч градусов — достаточно низкая температура, чтобы прицепить электроны к ядрам и сформировать таким образом первые атомы. В числе этих атомов подавляющее большинство составлял водород (более 90% всех атомов), входил небольшой процент гелия и вкрапления лития. Из смеси этих элементов образовались первые звезды.

Первоначальный свет

Гравитация — великий механизм формирования космических объектов. Атом водорода весьма мелок, но стоит числу атомов увеличиться в 10^{60} раз (это составит триллион триллионов триллионов триллионов триллионов атомов водорода) —

и сила их коллективного тяготения неизмеримо возрастет. Гравитация стянет их в центр, формируя звезду — гигантский газовый шар, предельно сжатый в центре. Когда огромный сгусток водорода сжимается, его потенциальная гравитационная энергия преобразуется в кинетическую энергию движущихся атомов, которая в свою очередь преобразуется в тепловую энергию — процесс, аналогичный тому, что происходит при столкновении Земли с астероидом, но сопровождаемый неизмеримо большим высвобождением энергии. Температура в ядре водородного шара повышается до миллионов градусов, а давление — до миллионов атмосфер.

Такая температура и давление инициируют новый феномен, называемый ядерным синтезом. В этих экстремальных условиях ядра двух атомов водорода (каждое из них содержит по одному протону) сталкиваются с такой силой, что ядра сливаются и один из протонов превращается в нейтрон — образуется тяжелый атом водорода. После ряда таких столкновений образуются ядра гелия с двумя протонами. Поразительно, что получившийся в результате атом гелия примерно на 1% легче исходных четырех атомов водорода, из которых он образовался. По мере обогащения звезды гелием за счет водорода она «воспламеняется», излучая энергию в окружающее пространство.

Крупные звезды, многие из которых гораздо больше нашего Солнца, с течением времени исчерпывают громадные запасы водорода, содержащегося в их ядрах. Однако чрезвычайно высокое внутреннее давление и тепловая энергия продолжают поддерживать ядерный синтез. Атомы гелия в звездном ядре превращаются в углерод — необходимый элемент для возникновения жизни, состоящий из шести протонов, и одновременно продолжаются всплески ядерной энергии, вызывающие водородный синтез в сферическом слое, окружающем ядро звезды. Затем из углерода синтезируется неон, из которого рождается кислород, затем формируется магний, потом кремний, сера и т. д. Постепенно звезда приобретает структуру луковицы, в которой ядерный синтез образует один за другим

слои из различных элементов. Ядерный синтез все ускоряется до тех пор, пока не наступает фаза образования железа, которая длится не более одного дня. К этому времени, много миллионов лет спустя после Большого взрыва, во многих звездах в процессе ядерного синтеза завершается цикл формирования первых 26 элементов периодической системы.

Железо является предельным элементом ядерного синтеза. Когда водород превращается в гелий, гелий в углерод и происходят все дальнейшие преобразования, высвобождается огромное количество ядерной энергии. Но ядро атома железа содержит наименьшее количество энергии по сравнению с ядрами других элементов. Когда огонь пожирает все топливо, превращая его в золу, тепловая энергия иссякает. Железо представляет собой своего рода ядерную золу; при столкновении атома железа с атомами других элементов ядерная энергия не возникает. Таким образом, когда в массивной звезде неизбежно формируется железное ядро, ее жизненный цикл заканчивается и происходит катастрофа. До этого момента в звезде поддерживается устойчивое равновесие между двумя мощными силами: гравитацией, притягивающей массу звездного вещества к центру, и давлением газа, выталкивающим эту массу из ядра. Когда ядро заполняется железом, процесс выталкивания массы из ядра останавливается, и победившая сила гравитации в один миг порождает катастрофу. Вся масса звезды настолько стремительно обрушивается к центру ядра, что отскок вызывает взрыв, который называют вспышкой сверхновой звезды. Звезда распадается, выбрасывая большую часть своего вещества в космическое пространство.

Рождение химии

Для тех читателей, которые пытаются представить себе устройство космоса, рождение сверхновой звезды ничуть не хуже Большого взрыва. Разумеется, Большой взрыв ведет к образованию атомов водорода, которые, в свою очередь, неизбежно приводят к образованию первых звезд. Однако путь от звезды

до знакомого нам мира далеко не так очевиден. Огромный шар, состоящий из атомов водорода, даже если в его ядре скапливаются более тяжелые элементы вплоть до железа, еще не указывает верного направления пути.

Но когда взрываются большие звезды, в космосе появляется нечто новое. Распавшиеся небесные тела усеивают космическое пространство всеми элементами, из которых они состояли. Углерод, кислород, азот, фосфор и сера — основные ингредиенты живой материи — появляются в изобилии. Магний, кремний, железо, алюминий и кальций, входящие в состав горных пород, из которых преимущественно и состоят планеты типа Земли, тоже имеются в достаточном количестве. Но в невообразимом поле энергии, порождаемом взрывающимися звездами, все эти элементы в процессе ядерного синтеза создают самые невероятные комбинации — в результате формируется вся Периодическая таблица, т. е. первичные 26 элементов образуют множество других. Именно тогда рождаются такие редкие элементы, как драгоценные металлы — серебро и золото, утилитарные вещества медь и цинк, ядовитые мышьяк и ртуть, радиоактивные уран и плутоний. Более того, эти элементы в космическом пространстве соединяются и взаимодействуют друг с другом во все новых и новых химических реакциях.

Химическая реакция происходит, когда один обычный атом сталкивается с другим таким же. У каждого атома имеется крохотное, но тяжелое ядро, обладающее положительным электрическим зарядом, окруженное облаком из одного или нескольких отрицательно заряженных электронов. Изолированные атомные ядра практически никогда не взаимодействуют, за исключением внутризвездной «скороварки», для которой характерны сверхвысокие температура и давление. Однако электроны разных атомов постоянно сталкиваются друг с другом. Химические реакции происходят в те моменты, когда встречаются два или более атомов и их электроны вступают во взаимодействие и перегруппировываются. Такое перемешивание и связывание электронов случается

по той причине, что их определенные комбинации оказываются наиболее устойчивыми, особенно совокупность двух, десяти или 18 электронов.

Первые химические реакции после Большого взрыва порождают молекулы — небольшие группы атомов, тесно связанных между собой. Еще до того, как атомы водорода в результате ядерного синтеза внутри звезд образуют гелий, в вакуумном пространстве глубокого космоса возникают молекулы водорода (H_2), каждая из которых состоит из двух атомов, тесно связанных между собой. У каждого атома водорода только один электрон, т. е. этот атом находится в нестабильном состоянии в условиях космоса, где действует магическое правило двух электронов. Так что встреча двух атомов водорода объединяет их электроны в общую молекулу, обеспечивающую стабильность. Принимая во внимание огромное количество водорода, возникшего в результате Большого взрыва, нетрудно прийти к выводу, что молекулы водорода предшествовали образованию звезд и составляли основную часть космоса с самого начала появления атомов.

Вслед за рождением сверхновых звезд, по мере того как в космосе рассеивались другие элементы, возникало множество интересных молекул. Среди них одним из самых ранних соединений стала вода (H_2O), в молекуле которой два атома водорода соединились с одним атомом кислорода. По всей видимости, именно в пространстве вокруг сверхновых звезд образовались молекулы азота (N_2), аммиака (NH_3), метана (CH_4), монооксида углерода (CO) и диоксида углерода (CO_2). Всем этим видам молекул предстояло сыграть важнейшую роль в формировании планет и появлении живой материи.

Затем образовались минералы — микроскопические твердые образцы химического совершенства и кристаллической структуры. Первые минералы могли появиться только в условиях высокой плотности скоплений минералообразующих элементов и сравнительно низких температур, чтобы атомы смогли образовать кристаллы. Всего несколько миллионов лет спустя после Большого взрыва благоприятные условия

для таких реакций возникли в разреженном и остывающем пространстве вокруг первых взорвавшихся звезд. Крошечные кристаллиты чистого углерода в форме алмаза и графита стали, вероятно, первыми минералами во Вселенной. Эти первые кристаллы представляли собой нечто вроде пыли, отдельные частицы были очень мелкие, но, возможно, достаточные по величине, чтобы сверкнуть в космосе бриллиантовым блеском. К первым углеродистым образованиям вскоре добавились другие высокотемпературные твердые вещества, образованные из таких элементов, как магний, кальций, азот и кислород. Среди них были знакомые нам минералы вроде корунда, химического соединения алюминия с кислородом, которое особенно ценится в своих ярких цветных разновидностях — рубинах и сапфирах. Тогда же появились в небольшом количестве хризолиты (силикат магния с другими составляющими), ныне полудрагоценные камни, астрологические знаки рожденных в августе, и муассаниты (карбид кремния), известные в наше время как дешевый искусственный суррогат бриллиантов. Всего в межпланетной пыли содержалось около дюжины известных нам «полезных ископаемых». Таким образом, после взрыва первых звезд Вселенная начинала становиться разнообразнее.

Ничто в космосе не случается единожды (за исключением, пожалуй, Большого взрыва). Рассеянные в космическом пространстве осколки взорвавшихся звезд постоянно подвергались воздействию сил гравитации. Таким путем остатки первого поколения звезд неизбежно порождали новые звездные скопления, формируя туманности, состоявшие из громадных облаков межзвездного газа и пыли, оставшихся после взрыва предыдущих поколений звезд. Каждая новая туманность содержала больше железа и немного меньше водорода, чем предыдущая. Этот цикл продолжался 13,7 млрд лет: старые звезды порождали новые, изменяя структуру космоса. Неисчислимые миллиарды звезд возникли в неисчислимом количестве галактик.

Космические ключи к разгадке

В давние-предавние космические времена, пять миллиардов лет тому назад, наше будущее «место жительства» располагалось на обочине Галактики, на полпути от центра Млечного Пути, в необитаемом спиралевидном рукаве, среди миллионов звезд. В этом скромном уголке мало что можно было обнаружить, кроме гигантского облака, состоявшего из межзвездного газа и ледяной пыли, простиравшегося на много световых лет в космическом мраке. Девять десятых этого облака составляли атомы водорода; из оставшейся доли девять десятых приходилось на атомы гелия. Один оставшийся процент состоял из мелких органических молекул и микроскопических частиц минерального вещества.

Такое газово-пылевое облако может существовать в космическом пространстве много миллионов лет, пока какой-нибудь импульс — например, ударная волна от взрыва ближайшей звезды — не запустит процесс образования в нем новой звездной системы. Именно такой пусковой механизм 4,6 млрд лет назад послужил началом формирования нашей Солнечной системы. Очень медленно, на протяжении миллиона лет, вихрь, состоявший из газа и пыли, втягивался внутрь к центру. Подобно вращающемуся фигуристу, гигантское облако крутилось все быстрее и быстрее, по мере того как гравитация притягивала его легкие края к центру. Сжимаясь и ускоряя вращение, облако постепенно уплотнялось и расплющивалось в форме диска, в центре которого росло новое небесное тело, — так рождалось Солнце. Этот центральный шар, вобравший в себя почти весь водород, становился все больше и больше, пока не поглотил 99,9% всей массы облака. В процессе его роста давление и температура внутри шара поднялись до точки ядерного синтеза, и Солнце зажглось.

Ключи к раскрытию последующих событий содержатся в летописи Солнечной системы, записанной в ее планетах и спутниках, кометах и астероидах, а также в бесчисленных и разнообразных метеоритах. Одним из таких ключей является

то, что все планеты и спутники обращаются вокруг Солнца в одной и той же плоскости и в одном и том же направлении. Более того, ближайшие к Солнцу планеты вращаются вокруг собственной оси примерно в той же плоскости и направлении. Ничто в законах движения не обусловливает эту общность вращения; планеты и спутники могли бы вращаться вокруг оси и по орбитам любым способом — с севера на юг, с востока на запад, сверху вниз или снизу вверх — и при этом не нарушать закона тяготения. Такое разнообразие наверняка имело бы место, если бы планеты и спутники были втянуты в Солнечную систему извне. Наблюдаемое орбитальное единообразие в нашей Солнечной системе, напротив, свидетельствует о том, что все ее планеты и спутники образовались в одном и том же плоском, крутящемся газово-пылевом диске и примерно в одно и то же время. Все эти гигантские космические тела сохраняют тот же принцип вращения — общий вращательный момент всей Солнечной системы — со времени начала закручивания облака.

Второй ключ к происхождению Солнечной системы кроется в характерном расположении восьми основных ее планет. Ближайшие к Солнцу планеты — Меркурий, Венера, Земля и Марс — представляют собой сравнительно небольшие твердотельные образования, состоящие преимущественно из кремния, кислорода, магния и железа. Плотные горные породы, вроде черного вулканического базальта, встречаются в основном на поверхности этих планет. В отличие от них четыре внешних планеты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — являются газовыми гигантами, главным образом состоящими из водорода и гелия. Эти громадные шары не имеют твердой поверхности и уплотняются по мере углубления в нижние слои атмосферы. Такое деление планет позволяет предположить, что в начальный период существования Солнечной системы, в течение нескольких тысяч лет после образования Солнца солнечный ветер — интенсивный поток заряженных частиц — выталкивал оставшийся водород и гелий во внешние, более холодные области. На достаточном удалении от излучения

Солнца эти летучие газы, остывая, уплотнялись, образуя независимые сгущения. Напротив, более крупные, богатые минералами частицы звездной пыли, оставшиеся поблизости от раскаленной звезды, быстро уплотнялись, образуя твердотельные внутренние планеты.

Подробности бурных процессов, сформировавших Землю и остальные внутренние планеты, запечатлены в поразительном многообразии метеоритов. Страшно представить, что на нашу Землю постоянно сыпятся камни с неба. Однако научное сообщество, надо признать, начало проявлять к ним интерес всего лет двести назад, хотя издавна существовал фольклор с красочными историями о метеоритах (например, история с неудачливыми французскими крестьянами). Даже более строгий научный подход к описанию метеоритных дождей страдал от недостатка научно обоснованных данных, а потому и от невозможности объяснения происхождения метеоритов. Американский государственный деятель и ученый-натуралист Томас Джефферсон, читая отчет Йельского университета о наблюдении за падением метеоритов в Вестоне, штат Коннектикут, скептически заметил: «Я скорее поверю в то, что ученые-янки лгут, чем в то, что камни падают с неба».

Позднее, спустя два века, в течение которых были обнаружены десятки тысяч метеоритов, наука наконец убедилась в достоверности их существования. По мере того как исследователи метеоритов охватывали все более обширные территории, а заядлые коллекционеры хвалились редчайшими образцами, музейные и частные коллекции становились все полнее и разнообразнее. Какое-то время в этих хранилищах наблюдался перекос в сторону железных метеоритов, чья черная кора, причудливые формы и чрезвычайная плотность отличали их от обычных камней. Но в 1969 г. на поверхности девственно чистых льдов Антарктиды были обнаружены тысячи метеоритов, и это кардинально изменило ситуацию.

Метеориты содержат важнейшую информацию о происхождении других планет. Самые распространенные из них хондриты, возрастом 4,656 млрд лет, относятся ко времени, пред-

шествовавшему образованию планет и спутников Солнечной системы, когда ядерный реактор Солнца пришел в действие и колоссальный выброс энергии воспламенил окружающее облако. В результате образовалась своего рода доменная печь, в которой межзвездная пыль, составлявшая облако, спеклась в крохотные вязкие капли, так называемые хондры (от греческого слова, означающего «зерно, гранула»). Размером от дробинки до небольшой горошины, эти продукты воздействия солнечного пламени переплавлялись множество раз, вслед за пульсацией излучения, которое преображало околосолнечное пространство. Скопления этих древнейших хондр сплавлялись в единое целое за счет более мелкой звездной пыли и фрагментов минерального вещества, образуя примитивные хондриты, миллионы которых оседали на поверхности Земли. Хондриты свидетельствуют о коротком промежутке времени между рождением Солнца и формированием планет.

Другой, более молодой вид метеоритов, именуемых ахондритами, относится ко времени, когда вещества Солнечной системы проходили первичную трансформацию: плавились, дробились и т. д. Среди ахондритов наблюдается удивительное разнообразие — кусочки блестящих металлов и обломки оплавленных камней, фрагменты гладкие, как стекло, и экземпляры, состоящие из глянцевитых кристаллов более 2 см в диаметре. До сих пор в самых отдаленных уголках Земли попадаются все новые разновидности ахондритов.

Антарктида — континент, который покрывают тысячи километров древнего голубого льда и где редко выпадает снег. Камни, прилетевшие из космоса, темными, инородными объектами выделяются на этом льду, ожидая, пока их найдут. Благодаря международным соглашениям, запрещающим коммерческое использование этого континента, а также труднодоступности его ледяных просторов, обеспечивается сохранность этих внеземных ресурсов для научных исследований. Группы хорошо экипированных ученых на вертолетах и снегоходах систематически обследуют ледяные пустыни, один квадратный километр за другим. Они тщательно регистрируют и упаковывают каж-

дую находку, стараясь не повредить ее поверхность ни руками, ни даже дыханием. Возвращаясь в цивилизованный мир после каждого антарктического сезона, эти охотники за метеоритами доставляют найденные сокровища в государственные хранилища, чаще всего на склады Смитсоновского института, расположенные в Сьютланде, штат Мэриленд, где тысячи и тысячи образцов хранятся в стерильно чистых, герметичных боксах, занимающих площадь размером с футбольное поле.

Не менее богаты метеоритами, хотя и не настолько доступны организованному собирательству и обеспечению стерильности, крупнейшие пустыни Австралии, юго-запада Америки, Аравийского полуострова и особенно Северной Африки — громадная пустыня Сахара. До обитателей Сахары, кочевых племен туарегов, берберов, тубу и других, дошли слухи, что метеориты могут дорого стоить. В начале XXI в. среди барханов Северной Африки был найден уникальный образец лунного метеорита, который, как считается, был продан в частной сделке за миллион долларов. Пустынному наезднику ничего не стоит сойти с верблюда, поднять какой-нибудь необычный булыжник и привезти его в ближайшую деревню, где представитель неофициальной гильдии охотников за метеоритами, обладающий спутниковым телефоном и хорошо подвешенным языком, перекупит у него камень за жалкие гроши. Через ряд посредников мешки с метеоритами, по пути все более дорожающие, переправляются в Марракеш, Рабат или Каир, а оттуда поступают к торговцам на eBay или на крупные международные выставки-ярмарки камней и минералов.

Во время геологических экспедиций в отдаленные части Марокко мне не раз предлагали мешки из дерюги, набитые камнями, предположительно метеоритами: «никаких посредников, прямо из пустыни, нашли только на прошлой неделе». Такие «сделки», исключительно за наличные, как правило, совершаются в грязных, темных комнатках в задней части хижин из сырцового кирпича, где нет окон, что спасает от палящего солнца пустыни, но не дает возможности толком рассмотреть, что именно тебе предлагают. После официальной

части, состоящей из обмена традиционными любезностями и нескольких чашек травяного чая, продавец высыпает содержимое мешка на ковер. Часть товара — это простые камни. Щебень. Нечто вроде проверки: разбираешься ли ты в метеоритах. Там обнаружится также несколько образцов заурядной разновидности хондритов размером от маслины до яйца, частично покрытые оплавленной коркой в результате стремительного прохождения через атмосферу. Стартовая цена обычно во много раз превышает разумную. Если покупатель заявляет, что это слишком обычные, распространенные метеориты, ему могут предложить другой мешок, поменьше, в котором, возможно, окажется железный метеорит или еще более экзотический образец.

Мне вспоминается одна такая сделка, совершенная нашим проводником Абдуллой на обочине пыльной дороги в нескольких километрах к востоку от Скуры. Продавец, не очень близкий его знакомый, к тому же сомнительной честности, позвонил по мобильному телефону и потребовал обеспечить секретность сделки. «Может, это марсианский метеорит, — сообщил он Абдулле. — Девятьсот граммов. Всего за двадцать тысяч дирхамов». Это около 2400 долларов — если метеорит действительно марсианский и может быть включен в пару дюжин известных образцов, имеющих марсианское происхождение, то сделка довольно выгодная. Они договорились о времени и месте встречи. Два неописуемо странных, неухоженных автомобиля затормозили друг возле друга, мы стали втроем в тесно сомкнутый кружок. Вышеупомянутый образец был аккуратно вынут из бархатного мешочка. Выглядел он самым что ни на есть обычным камнем (впрочем, так выглядят практически все марсианские метеориты). Цена снизилась до 15 000 дирхамов. Затем до 12 000. Но убедиться в его подлинности было невозможно, поэтому мы расстались. Позднее Абдулла признался мне, что его так и одолевало искушение купить, но хорошо, что метеориты попадаются достаточно часто. Лучше не жадничать и не бросаться на первое попавшееся предложение; правды там не добьешься, а сделки расторжению не подлежат.

Подобно льдам Антарктиды, экваториальные пустыни позволяют обнаружить все типы метеоритов, открывая тем самым перспективу раскрыть характер начального этапа формирования Солнечной системы, а следовательно, и происхождения нашей родной планеты. К сожалению, в отличие от Антарктиды, большинство метеоритов, обнаруженных в пустынях, не достигает музейных собраний, по меньшей мере по двум причинам. Главным образом из-за возрастающего числа коллекционеров-любителей (раззадоренных богатыми собирателями и доступностью сахарских находок), составляющих серьезную конкуренцию специалистам. Любой редкий образец немедленно продается, к тому же за большие деньги. Некоторые из таких находок впоследствии наверняка будут переданы в качестве пожертвований в фонды музеев, но большая часть из них подвергается всем опасностям непрофессионального обращения, теряя научную ценность, поскольку к ним прикасаются голыми руками, складывают в непригодные для этой цели мешки многоразового использования и даже роняют в повсеместно распространенный верблюжий помет. Не меньший урон наносится и отсутствием надежной документации, в которой указывалось бы, где и когда данные метеориты были найдены. Большинство перекупщиков сообщат вам, что это «найдено в Марокко», и, разумеется, солгут, поскольку основная территория Сахары расположена восточнее, в Алжире и Ливии — странах, где вывоз метеоритов запрещен законом. А без точной документации большинство музеев откажутся принимать «марокканские» или «североафриканские» образцы.

В неприветливых, засушливых просторах Сахары или голубых льдах Антарктиды любой камень выглядит как чужеродное тело, упавшее с неба. Такие чистейшие образцы метеоритов дают ученым представление о начальных стадиях формирования Солнечной планетной системы, в которой возникла и Земля. Девять десятых всех находок составляют хондриты; оставшаяся часть состоит из разнообразных ахондритов, возникших в начальную эпоху формирования Солнечной системы

из вращающегося газово-пылевого облака, продолжавшуюся несколько миллионов лет, в течение которых хондриты склеивались во все более и более крупные тела — планетезимали*. Вначале они были размером с кулак, затем — с автомобиль, а впоследствии достигли размеров небольшого города. Миллиарды таких тел диаметром несколько километров и больше отвоевывали для себя пространство в пределах узкого кольца вокруг новорожденного Солнца.

Они становились все больше и больше и достигали размеров целых штатов — сначала Род-Айленда, потом Огайо, Техаса, Аляски. Когда появились тысячи таких хаотически увеличивающихся планетезималей, наступила следующая стадия. Достигая более 80 км в диаметре, два одинаково раскаленных тела соединялись. Гравитационная энергия от столкновения малых тел по интенсивности не уступала ядерной энергии при быстром распаде таких радиоактивных элементов, как гафний или плутоний. Возникшие при этом температуры приводили к трансформации минералов в таких планетезималях, их внутренние области плавились, образуя зоны различных минералов, напоминающие структуру яйца: плотное металлическое ядро (аналогичное желтку в яйце), мантия, состоящая из силиката магния (белок яйца), и тонкая, ломкая кора (яичная скорлупа). Самые крупные из таких планетезималей формировались под влиянием внутренней тепловой энергии, взаимодействия с водой и постоянных столкновений в перенаселенном околосолнечном пространстве. В результате динамических процессов формирования планет, по-видимому, и образовались три сотни различных минеральных веществ. Эти три сотни минералов и послужили сырьем для формирования твердотельных планет, все эти вещества до сих пор обнаруживаются в падающих на Землю метеоритах.

Время от времени две достаточно крупные планетезимали сталкивались с такой силой, что разлетались на осколки. (Этот

---

* Теория формирования планет, включающая так называемую «гипотезу планетезималей», была предложена советским астрономом В. Сафроновым и в настоящее время поддерживается большинством астрономов мира. — *Прим. ред.*

бурный процесс до сих пор продолжается в поясе астероидов за Марсом, вследствие гравитационного воздействия гигантской планеты Юпитер.) Соответственно большая часть разнообразных ахондритов, которые мы находим теперь, является осколками таких разрушенных планетезималей. Исследование ахондритов напоминает, таким образом, урок анатомии на примере разъятого на части трупа. Требуется много времени, терпения и множество образцов, чтобы представить ясную картину целого тела.

Легче всего анализировать плотные металлические ядра таких планетезималей, представленных в виде железных метеоритов. Когда-то считалось, что это самый распространенный тип метеоритов, однако большая выборка антарктических образцов позволила выяснить, что железные метеориты составляют весьма скромную долю — 5% всех выпадений. Соответственно ядра планетезималей должны были отличаться небольшими размерами.

Мантии планетезималей, богатые кремниевыми солями, напротив, представлены в большом разнообразии: говардиты, эвкриты, диогениты, урейлиты, акапулькоиты, лодраниты и т. д. — все они отличаются характерной структурой, текстурой и минералогическим составом и названы по местности, в которой найден первый соответствующий образец. Некоторые из этих метеоритов аналогичны горным породам, существующим на Земле в наше время. Эвкриты представляют собой одну из типичных разновидностей базальта — горной породы, которая обязана своим происхождением вулканической деятельности Срединно-Атлантического хребта и выстилает океаническое дно. Диогениты, состоящие преимущественно из силиката магния, по-видимому, являются результатом оседания кристаллов в крупных подземных резервуарах магмы. По мере охлаждения магмы кристаллы становились плотнее окружающей расплавленной среды, росли и опускались на дно, образуя концентрированную массу, аналогичную той, которая образуется в наше время глубоко под землей в магматических камерах Земли.

Иногда, во время особенно разрушительных столкновений метеорит мог захватить частицы силикатных соединений из пограничной зоны между ядром и мантией планетезимали, где силикаты соединены с металлами. В результате появлялся прекрасный палласит — потрясающее сочетание блестящего металла и золотистых кристаллов оливина. Шлифованный срез палласита, где блики сверкающего металла на фоне оливина выглядят словно витражи, выделяют его среди самых красивых образцов в мировом собрании метеоритов.

Под воздействием гравитации ранние хондриты соединялись в группы, и сокрушительное давление, высокие температуры, агрессивная вода и жесткие столкновения преобразовывали планетезимали, создавая все новые виды минеральных веществ. В целом во всех образцах метеоритов обнаружено более 250 различных минералов — в 20 раз больше досолнечных протоминералов. Эти разнообразные твердые вещества, включающие раннюю мелкую пыль, пластины слюды и полудрагоценный цирконий, послужили основным строительным материалом для формирования Земли и других планет. Планетезимали разрастались по мере того, как самые крупные из них поглощали более мелкие. В результате этого поглощения несколько дюжин крупных каменных шаров, каждый величиной с небольшую планету, подобно гигантским пылесосам, подчищая на своем пути внутри Солнечной системы значительную часть пыли и газа, срастались между собой и выравнивали свои орбиты до почти идеальных окружностей. Расположение орбит в значительной мере зависело от массы планет.

Сборка Солнечной системы

Солнце, составляя львиную долю общей массы Солнечной системы, занимает в ней господствующее положение. Сама по себе наша система не принадлежит к числу особо массивных, т. е. Солнце является звездой скромных размеров, что весьма благоприятно для планеты, на которой есть жизнь. Удивительно, но чем больше масса звезды, тем короче ее жизнь.

Сверхвысокие температуры и давление внутри больших звезд ускоряют процесс ядерного синтеза. Таким образом, звезда, в десять раз превышающая по массе Солнце, завершает свой цикл в сотни раз быстрее — ее существование длится не более нескольких десятков миллионов лет, что едва ли достаточно для возникновения жизни на одной из ее планет до того, как звезда взорвется, превращаясь в смертоносную сверхновую. И наоборот, какой-нибудь красный карлик, массой в десять раз меньше Солнца, существует в сотни раз дольше, но при этом его слабое излучение может оказаться недостаточным для поддержания жизни на планете, в отличие от нашего желтого благодетеля — Солнца.

Наша промежуточная по массе звезда относится к золотой середине: не слишком большая, с коротким сроком существования, но и не слишком мелкая с недостаточной энергией теплового излучения. Предполагаемый срок ее существования, 9–10 млрд лет безотказного выгорания водорода, предоставляет достаточно времени для развития и поддержания жизни. Конечно, через каких-нибудь 4–5 млрд лет водород в ядре Солнца закончится и звезда перейдет к стадии выгорания гелия. В ходе этого процесса она разбухнет в недружелюбный красный гигант, диаметром в 100 раз больше нынешнего, для начала уничтожит несчастный маленький Меркурий, сожжет и поглотит Венеру и причинит большие неудобства Земле. Тем не менее даже по прошествии 4,5 млрд лет, у нас еще есть время, пока Солнце не войдет в последнюю стадию, когда само существование жизни на Земле станет весьма проблематичным.

Солнечная система обладает еще одной особенностью, благоприятной для существования жизни на планете. В отличие от множества других планетных систем, наша образована вокруг одной звезды. С помощью мощных телескопов астрономы обнаружили, что примерно две трети видимых звезд являются двойными, т. е. такими системами, в которых две звезды «танцуют» вокруг друг друга и имеют общий гравитационный центр. Во время формирования таких звезд водород скапливался

в двух отдельных точках пространства, образуя два гигантских газовых шара.

Если бы наше газово-пылевое облако закручивалось сильнее, имея больший момент импульса и, как следствие, большую массу в районе Юпитера, Солнечная система тоже сформировалась бы с двойной звездой. Солнце было бы меньше, а Юпитер, вместо того чтобы стать гигантской, насыщенной водородом планетой, вырос бы до размеров небольшой, богатой водородом звезды. Возможно, жизнь процветала бы между двумя звездами. Или вторая звезда послужила бы дополнительным источником энергии, необходимым для поддержания жизни. Однако гравитационная динамика в двухзвездной системе непредсказуема, и могло бы случиться так, что Земля, активно перемещаясь между двумя мощными источниками притяжения, оказалась бы непригодной для жизни планетой с вытянутой орбитой, неустойчивым вращением и бурными колебаниями климата.

Ныне же наши гигантские газовые планеты, с их скромными размерами и почти круговыми орбитами, ведут себя вполне прилично. Масса самой большой из них, Юпитера, в тысячу раз меньше Солнца. Этого достаточно, чтобы оказывать весомое воздействие на соседние планеты; благодаря сильному гравитационному полю Юпитера планетезимали в области пояса астероидов так и не срослись в единую планету. При этом массы Юпитера недостаточно для того, чтобы запустить в собственном ядре процесс ядерного синтеза — факт решающего различия между звездами и планетами. Дальняя, окруженная кольцами, планета Сатурн и еще более удаленные холодные Уран и Нептун обладают гораздо меньшими размерами.

Тем не менее все эти газовые планеты-гиганты оказались достаточно крупными, чтобы притянуть на свои орбиты мелкие осколочные небесные тела, образовав нечто вроде собственных маленьких солнечных систем внутри Солнечной системы. В результате вокруг всех четырех внешних планет образовалась свита чрезвычайно интересных спутников, включая срав-

нительно небольшие астероиды, удерживаемые на орбите воздействием гравитационного притяжения планет-гигантов.

Другие спутники, в том числе и сопоставимые по размерам с внутренними планетами и подверженные динамичным геологическим процессам, образовались не столько из остатков пыли и газа, сколько из осколков, появившихся в процессе формирования других планет. Наиболее активным небесным телом во всей Солнечной системе является спутник Юпитера Ио, чья орбита настолько близка к газовому гиганту, что полный его оборот вокруг Юпитера занимает всего 41 час. Мощные приливные силы постоянно воздействуют на этот спутник диаметром 3643 км, пробуждая примерно полдюжины вулканов, которые выбрасывают гигантские плюмы высотой в сотни километров — уникальное явление в Солнечной системе. Не меньший интерес представляют Европа и Ганимед, крупные спутники размером примерно с Меркурий, состоящие из воды и горных пород — примерно в равных пропорциях. Оба эти спутника разогреты изнутри под влиянием постоянно действующих приливных сил Юпитера. Почти всю их поверхность составляют покрытые льдом океаны, что зафиксировано исследователями НАСА в процессе поиска возможного существования жизни на других планетах.

Сатурн, следующий в ряду внешних планет, обладает более чем пятью дюжинами спутников, не говоря уже о знаменитых кольцах, большую часть которых составляют сверкающие куски льда. Большинство спутников Сатурна имеет сравнительно небольшие размеры и является либо захваченными астероидами, либо осколками самого Сатурна; однако крупнейший из его спутников — Титан — превышает размерами планету Меркурий и окутан толстым слоем атмосферы оранжевого цвета. Благодаря запущенному ЕКА (Европейское космическое агентство) посадочному модулю «Гюйгенс», который опустился на Титан 14 января 2005 г., мы получили с поверхности спутника снимки крупным планом. Разветвленная сеть рек и потоков питает холодные озера, состоящие из жидких углеводородов; в густой, красочной, турбулентной атмосфере содержится боль-

шое количество органических молекул. В общем, на Титане стоит поискать признаки жизни.

Самые удаленные газовые планеты-гиганты Уран и Нептун удерживают большое число не менее интересных спутников. На большинстве из них наблюдаются признаки водяного льда, органических молекул и явные динамические процессы. Атмосфера Тритона, крупного спутника Нептуна, богата азотом. Оба гиганта окружены сложно устроенными системами колец, хотя эти кольца состоят, очевидно, по большей части из комков темного углеродистого вещества, размерами примерно с автомобиль, совсем непохожего на блестящие ледяные кольца Сатурна.

Каменные миры

Ближе к нашей планете гравитационное поле сохраняет свое влияние. Большая часть водорода и гелия после того, как Солнце зажглось, была вытеснена в район внешних планет-гигантов, и на внутренние области Солнечной системы пришлась малая доля массы вещества, в основном состоящего из твердых горных пород, наблюдаемых в составе хондритов и ахондритов. Ближе всего к Солнцу сформировался Меркурий — самая маленькая и безводная из каменных планет. Неприветливый, выжженный мир этой самой внутренней из внутренних планет кажется пустым и безжизненным: миллиарды лет его изрезанная кратерами поверхность под лишенным атмосферы небом сохраняется в одном и том же виде. Если поспорить, на какой из планет Солнечной системы наверняка нет жизни, можно смело ставить на Меркурий.

Венера — следующая по порядку планета, близнец Земли по размеру, но в корне отличная от нее по пригодности для жизни — в основном из-за расположения ее орбиты, примерно на 50 млн километров ближе к Солнцу. В начале ее существования на ней, возможно, имелась вода, даже неглубокий океан, но под воздействием теплового излучения и солнечного ветра вода на Венере почти выкипела, лишив планету влаги. Углекислый газ, преобладающий в атмосфере Венеры, закупорил энер-

гию солнечного излучения и таким образом обеспечил парниковый эффект. Ныне средняя температура на поверхности Венеры достигает почти 500°C — достаточно, чтобы расплавить свинец.

Марс, ближайший сосед Земли и следующий за ней в ряду внутренних планет, гораздо меньше ее (всего одна десятая от массы Земли), но во многих отношениях похож на нашу планету. Как все твердотельные планеты, Марс имеет металлическое ядро и силикатную мантию. Подобно Земле, у него есть атмосфера и значительный запас воды. Относительно слабая гравитация не позволяет Марсу удерживать молекулы газа в верхних слоях атмосферы, так что за миллиарды лет он потерял большую часть воды и воздуха, но все же сохранил теплые и влажные пространства под поверхностью, где могла в какой-то мере поддерживаться жизнь. Неудивительно, что все планетные изыскания нацелены главным образом на эту красную планету.

Земля, «третий камень от Солнца»*, находится посредине зоны жизни** Солнечной системы. Земля расположена довольно близко к Солнцу и нагрета настолько, что смогла вытолкнуть значительные объемы водорода и гелия во внешние области Солнечной системы, но при этом достаточно удалена от него и настолько охлаждена, что смогла удержать большую часть воды в жидком виде. Как и остальные планеты Солнечной системы, она возникла около 4,5 млрд лет назад, в основном за счет столкновения хондритов и их последующего группирования во все более и более крупные планетезимали — и так на протяжении нескольких миллионов лет.

Глубины времени

Все, что нам известно о том, как возникли Солнце, Земля и вся Солнечная система, укладывается в представление о колос-

---

* По созвучию с песней Джимми Хендрикса «Third Stone From The Sun». — *Прим. ред.*

** Зона жизни — здесь область около звезды, в которой на планетах, имеющих подходящее атмосферное давление, теоретически может существовать жидкая вода, а значит, есть вероятность существования жизни. — *Прим. ред.*

сальном периоде — чуть больше 4,5 млрд лет. Мы, американцы, любим отмечать известные даты в истории человечества. Мы отмечаем даты знаменитых изобретений и открытий, например, испытание моторного летательного аппарата братьями Райт 17 декабря 1903 г. или первый полет человека на Луну 20 июля 1969 г. Мы чтим даты общенародных трагедий и испытаний, например, 7 декабря 1941 г. или 11 сентября 2001 г. Конечно же, не забываем дни рождения: 4 июля 1776 г. и, разумеется, 12 февраля 1809 г. (общий день рождения Чарльза Дарвина и Авраама Линкольна). Мы убеждены в достоверности этих памятных дат, поскольку они зафиксированы как в устной, так и в письменной традиции, связывающей нас с не столь отдаленным собственным прошлым.

У геологов тоже принято вести счет времени: около 12 500 лет назад кончилось последнее великое оледенение и люди начали заселять Северную Америку; 65 млн лет назад вымерли динозавры и многие другие существа; в самом начале кембрийского периода, 530 млн лет назад, внезапно появились разнообразные животные с твердым скелетом; более 4,5 млрд лет назад планета Земля начала обращаться вокруг Солнца. Но откуда мы знаем, что эти датировки достоверны? Не существует ни устных, ни письменных источников старше нескольких тысячелетий, где отмечались бы хронологические данные о развитии Земли.

Четыре с половиной миллиарда лет почти невозможно себе представить. Согласно Гиннессу, мировой рекорд долголетия принадлежит француженке, отметившей 122-й день рождения, так что человек не проживает и 4,5 млрд секунд (примерно 144 года). Вся зафиксированная история человечества насчитывает менее 4,5 млрд минут. И все же геологи утверждают, что Земля кружится вокруг Солнца более 4,5 млрд лет.

Такую седую древность нелегко вообразить, но я все же иногда пытаюсь это сделать в процессе длительных прогулок. Южнее Аннаполиса, штат Мэриленд, на 35 км тянутся внушительные, причудливые каменные утесы, окаймляющие с запада Чесапикский залив. Идя вдоль узкой песчаной полосы между

сушей и морем, можно найти большое количество ископаемых остатков двустворчатых моллюсков, спиральных улиток, кораллов и морских ежей. Изредка, если очень-очень повезет, можно наткнуться на 15-сантиметровый зазубренный акулий зуб или вдруг покажется полутораметровый череп кита, имеющий обтекаемую форму. Эти драгоценные реликты повествуют о времени 15 млн лет назад, когда климат здесь был гораздо теплее и ближе к тропическому, как на острове Мауи, и сюда приплывали рожать величественные киты, а чудовищные 20-метровые акулы охотились на их беззащитных детенышей. Их окаменелые остатки встречаются в толще осадочных пород мощностью 300 м, в которой запечатлено более трех миллионов лет истории Земли. Слои песка и мергеля очень плавно погружаются к югу, так что прогулка по взморью подобна путешествию во времени. Каждый шаг в северном направлении постепенно открывает все более древние слои.

Чтобы представить себе масштаб истории Земли, вообразите прогулку в прошлое, с каждым шагом углубляясь на 100 лет назад, т. е. на три поколения в пересчете на человеческий возраст. Полтора километра такой прогулки уведут вас на 175 тыс. лет назад. Конечно, 25 км Чесапикских холмов — серьезный маршрут для дневной прогулки, зато он уведет вас в прошлое более чем на три миллиона лет. Но для более или менее значимой отметки в истории Земли придется совершать этот подвиг в течение многих недель. Двадцать дней по 25 км в день помножьте на количество шагов по сто лет каждый — и вы достигнете отметки 70 млн лет назад — период, предшествовавший гибели динозавров. Пять месяцев таких прогулок уведут вас на 530 млн лет назад, во времена кембрийского «взрыва» — почти одновременного появления несметного числа животных с твердым скелетом. Со скоростью, равной ста годам на каждый шаг, вам понадобится не менее трех лет, чтобы достичь времени зарождения жизни, и почти четыре года, чтобы прийти к истокам истории Земли.

Можем ли мы быть уверенными в этих цифрах? Исследователи собрали большое количество разнообразных данных,

которые определенно указывают на невероятную древность Земли — на глубины времени. Самые наглядные свидетельства — геологические процессы, которые приводят к ежегодным отложениям осадков; сосчитав слои, можно сосчитать количество лет. Наиболее впечатляющим примером геологического календаря являются вары — сезонные микрослойки — тонкие перемежающиеся слои светлых и темных отложений, в которых представлены весенние осадки, грубозернистые, и зимние, мелкозернистые. Тщательно документированные пробы из ледниковых озер в Швеции представляют данные о 13 527 годах осадконакопления, когда ежегодно появлялся новый сдвоенный слой. Тонкослоистый сланец Грин-Ривер, который обнажается в крутых склонах великолепных каньонов Вайоминга, представляет собой непрерывный вертикальный разрез, в котором можно насчитать более миллиона годовых слойков. Точно так же скважины, пробуренные на глубину тысяч метров в ледниках Антарктиды и Гренландии, вскрывают отложения, которые образовывались в течение более 800 тыс. лет, год за годом, слой за слоем в результате выпадения снега. Все эти отложения располагаются поверх еще более древних горных пород.

Измерения более медленных геологических процессов позволяют еще глубже проникнуть в историю Земли. Для формирования массивных Гавайских островов потребовались нечастые, но регулярные вулканические извержения, в результате которых лавовые слои накладывались один на другой. Если судить по интенсивности современных извержений, это происходило в течение по меньшей мере десятков миллионов лет. Аппалачи и другие древние, пологие горные массивы приобрели свой современный вид за сотни миллионов лет постепенного выветривания, а едва ощутимые сдвиги тектонических плит, которые перемещают континенты и увеличивают океаны, происходят циклами в сотни миллионов лет каждый.

Не менее убедительные доказательства глубины времен представляют физика и астрономия. Постоянная и уже вычисленная скорость распада радиоактивных изотопов углерода,

урана, калия, рубидия и других элементов является исключительно точным инструментом для установления возраста геологических процессов, и часы эти уводят в прошлое на миллиарды лет назад, к моменту формирования Солнечной системы. Если взять миллион атомов радиоактивного изотопа, половина из них распадется за срок, который называется периодом полураспада. Например, из миллиона атомов урана-238 с периодом полураспада 4,468 млрд лет к концу этого периода останется половина. Остальные атомы за это время распадутся, образовав до полумиллиона атомов других элементов, заканчивая устойчивыми атомами свинца-206. Еще через 4,468 млрд лет останется только четверть атомов урана. Так, с помощью радиометрического датирования был установлен возраст древнейших примитивных хондритов — 4,566 млрд лет.

А как насчет бесчисленных миллиардов лет до образования Солнечной системы? Астрофизические измерения перемещения отдаленных галактик указывают на то, что Вселенная гораздо старше 4,5 млрд лет. Все галактики удаляются от нас и друг от друга. Данные доплеровского (красного) смещения подтверждают, что чем дальше от нас расположены галактики, тем выше их скорость удаления. Если прокрутить обратно эту космическую ленту, то все сойдется в одной точке — 13,7 млрд лет назад. Это момент Большого взрыва. Свет от многих удаленных объектов идет к нам через космическое пространство более 13 млрд лет.

Эти данные доказаны со всей неопровержимостью. Любые заявления, что Земля не старше десяти тысяч лет, противоречат однозначным данным всех научных наблюдений. Единственная альтернатива состоит в том, что космос был создан десять тысяч лет назад сразу безмерно старым — именно к такому выводу пришел британский естествоиспытатель Филип Госсе в опубликованном в 1857 г. противоречивом трактате Omphalos* (в названии использовано греческое слово, означающее «пуп, пупок», поскольку не имеющий матери Адам

* Полное название книги: Omphalos: An Attempt to Untie the Geological Knot («Пуп Земли, или попытка развязать геологический узел»). — *Прим. ред.*

был сотворен с пупком, чтобы выглядеть так, словно его родила женщина). Госсе каталогизировал сотни страниц свидетельств невероятной древности Земли, а затем выдвинул гипотезу о том, что Бог создал ее десять тысяч лет назад сразу со всеми признаками древности.

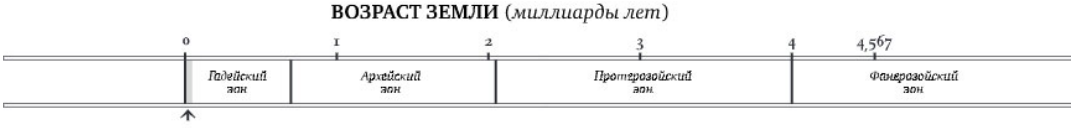
Некоторым может показаться удобной эта креационистская уловка «сотворенной древности» мира, известная как протохронизм. Астрофизикам, которые выдвигают свидетельства того, что звезды и галактики находятся от нас на расстоянии миллиардов световых лет, протохронисты возражают, что Вселенная была создана с уже идущим к Земле от дальних звезд и галактик светом. Горные породы с древним соотношением радиоактивных и дочерних изотопов, утверждают они, были сразу созданы с исходным смешением урана, свинца, калия и аргона, а потому выглядят старше, чем они есть на самом деле. Если вы придерживаетесь таких взглядов, то можете пропустить главу 11, повествующую о возможных сценариях будущего Земли. Если нет, то попробуйте вообразить прошлое на несколько миллиардов лет назад, когда возникла наша планета.

Рождение Земли 4,5 млрд лет назад — это событие, которое бессчетные триллионы раз повторялось в истории Вселенной. Каждая звезда или планета возникает в разреженном, почти вакуумном пространстве из газа и космической пыли — мельчайших частиц материи, невидимых невооруженным глазом, но заметных на расстоянии в полгалактики как огромные облака, из которых рождаются звезды. Миллиарды лет назад гравитация послужила повитухой при рождении Солнечной системы — Солнце стало единственным гигантом среди карликовых планетных тел. Ядерные реакции воспламенили вещество Солнца, которое окружило теплом и светом свои планеты. И наша Земля сделала первые робкие шаги к тому, чтобы стать обитаемым миром.

Какими бы чуждыми ни казались нам эти эпохальные события, мы ежедневно на протяжении всей жизни ощущаем на себе те же космические явления, которые привели к обра-

зованию Земли. Наши тела и среда обитания состоят из тех же самых веществ и атомов, которые сформировали Землю. Нас крепко удерживает на планете та же самая сила гравитации, которая скомпоновала звезды и планеты из газа и пыли и выковала химические элементы внутри звезд. Когда игра идет по универсальным законам физики и химии, ничего нет нового под Солнцем.

Горные породы, звезды и сама жизнь преподносят нам одни и те же уроки. Чтобы понять Землю, вы должны отвлечься от весьма незначительного пространственно-временного масштаба человеческой жизни. Мы живем в единственном крошечном мире среди необозримых просторов космоса, вмещающего 100 млрд галактик, каждая из которых состоит из сотен миллиардов звезд. Точно так же, день за днем мы живем в космосе, возраст которого сотни миллиардов дней. Ни смысл, ни путь космоса вы не найдете даже в самом лучшем мгновении или месте, связанном с человеческим существованием. Масштабы космического пространства и времени непостижимо велики. Поскольку появление Вселенной неизбежно вследствие непреложных универсальных законов космоса, которые дают нам надежду познать Вселенную, используя научный метод, такой космос, несомненно, исполнен смысла.



Глава 2

Мощный удар

Образование Луны

Возраст Земли: от 0 до 50 млн лет

Основной принцип, которого я придерживаюсь в этой книге, заключается в том, что планеты развиваются: они меняются с течением времени. Более того, каждая ступень эволюции зависит от предыдущего ряда ступеней. Чаще всего изменения происходят постепенно, в течение миллионов, а то и миллиардов лет, шаг за шагом преобразуя планету, но могут произойти и мгновенные, резкие и необратимые события, которые изменят ее навсегда. Так и произошло с Землей. Наша планета образовалась сравнительно быстро из бесчисленных частиц и звездного мусора, по некоторым оценкам, на это понадобилось не больше миллиона лет. К концу этого процесса довольно близко от Протоземли располагались несколько дюжин планетезималей, сотни километров в диаметре каждая. На протяжении примерно сотен тысяч лет, пока Земля достигала своего нынешнего размера, последние стадии этого процесса сопровождались столкновениями невообразимой силы. Каждые несколько тысяч лет одна мини-планета за другой врезались в Землю и поглощались ею.

В эти беспокойные времена Земля представляла собой горячую, почерневшую сферу, покрытую красными, раскаленными

трещинами, фонтанами вулканической магмы и следами беспрерывных падений метеоритов. Каждый из таких гигантских налетчиков врезался в сферу, дробя в пыль камни, выбрасывая их на орбиту и превращая поверхность планеты в расплавленную, огненно-красную жижу. Однако в космосе царит холод, и лишенная атмосферы поверхность Земли после каждого такого метеоритного удара очень быстро охлаждалась и снова чернела.

Странная Луна

История формирования Земли выглядит довольно гладко, за исключением одной поразительной детали: Луны. Ее нельзя было не заметить, и на протяжении последних двух столетий постепенно становилось очевидным, что ее свойства невероятно трудно объяснить. Спутники поменьше понятны. Фобос и Деймос, два неправильной формы каменных массива размером с город на орбите Марса, по-видимому, являются притянутыми гравитацией астероидами. Дюжины спутников вокруг Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, хотя и покрупнее, все же выглядят крохотными по сравнению с планетами-хозяевами — их масса в тысячи раз меньше массы планет, вокруг которых они обращаются. Крупнейшие из них образованы из невостребованных остатков пыли и газа в процессе формирования планет Солнечной системы и обращаются вокруг газовых гигантов, словно планеты в миниатюрных планетных системах. В отличие от них, Луна сопоставима по размерам с Землей, вокруг которой она движется: ее диаметр составляет более четверти земного, а масса всего в 80 раз меньше массы Земли. Как же возникла такая аномалия?

Историческая наука, особенно история Земли и планет, основана на вдохновенном повествовании (возможно, отчасти соответствующем фактам). Если существует сразу несколько историй, основанных на наблюдениях, геологи применяют осторожную формулу, известную как «многовариантная рабочая гипотеза» — эта стратегия знакома всем любителям детективных романов.

Еще до знаменитой посадки «Аполлона» на Луну, начиная с 1969 г., когда был открыт состав древних горных пород Луны* и стало возможным геофизическое исследование ее внутренних областей, в деле увесистой Луны фигурировали три главных подозреваемых. Первой, получившей широкую поддержку, гипотезой стала идея разделения, выдвинутая в 1878 г. Джорджем Говардом Дарвином (гораздо менее известным, чем его знаменитый отец Чарльз Дарвин). Согласно модели Джорджа Дарвина, расплавленная Земля первоначально вращалась вокруг своей оси с такой скоростью, что она вытягивалась и удлинялась до тех пор, пока с ее поверхности не сорвался сгусток магмы и стал вращаться по собственной орбите вокруг материнской планеты (при этом гравитационная сила Солнца почти не оказала на него воздействия). По данной теории Луна — это росток, отпочковавшийся от Земли. В одном из вариантов этого драматичного вымысла предполагается, что впадина Тихого океана — это шрам, полученный при родах спутника.

С этой моделью соперничала другая, основанная на теории захвата, согласно которой Луна представляла собой независимую планетезималь, возникшую в окрестностях Земли в процессе формирования Солнечной системы. В какой-то момент два небесных тела проходили так близко друг от друга, что более массивная Земля захватила Луну, сместила ее с независимой орбиты и постепенно привязала к себе. Такое проявление гравитационной энергии успешно притянуло каменистые спутники Марса — почему бы не предположить нечто подобное в отношении Земли?

В третьей гипотезе, основанной на теории совместного формирования, была выдвинута идея о том, что Луна сформировалась примерно в ее нынешнем положении на орбите из большой тучи обломков, оставшихся не востребованными на орбите Земли. Идея выглядит вполне правдоподобно, воспроизводя

---

* Первое инструментальное определение плотности и прочности поверхностного слоя лунного грунта (риголита) было проведено советской автоматической станцией «Луна-13» 24–31 декабря 1966 г. — *Прим. ред.*

сценарий образования планет вокруг Солнца или спутников вокруг газовых планет-гигантов. Такие процессы регулярно повторялись в Солнечной системе: небольшие объекты образовывались из туч пыли, газа и камней вокруг более крупных небесных тел.

Целых три гипотезы — которая из них верна? Пытливым умам пришлось дожидаться данных анализа лунного грунта — более четырех центнеров образцов с шести посадочных площадок «Аполлонов».

Посадка на Луну

Полеты на Луну по программе «Аполлон» значительно обогатили науку о планетах. Они, безусловно, стали образцом американской доблести и продемонстрировали технологическую мощь страны. И, конечно же, они оказались колоссальным подспорьем военно-промышленному комплексу. Кроме того, они послужили толчком для множества открытий и изобретений, от мини-компьютеров до полимеров и напитка Tang, обеспечив такой рост экономики, который в разы окупил 20 млрд долларов, потраченных на полеты «Аполлонов». Неудивительно, что эти опасные и дорогостоящие экспедиции стимулировались в основном не интересами научного изучения Луны, а национальной гордостью и борьбой за первенство. Тем не менее трудно переоценить вклад полетов «Аполлонов» с их бесценной добычей лунных пород в развитие геологии и геофизики. На протяжении всей истории человечества Луна находилась совсем близко от Земли — на расстоянии менее 400 тыс. км. Когда при ясном закате в небе начинает краснеть полная Луна, кажется, протяни руку — и ты дотронешься до нее. Но образцов грунта у нас не было, и невозможно было судить, из чего состоит Луна, когда и где она образовалась. Благодаря первой партии образцов лунных пород мы впервые в истории в буквальном смысле слова прикоснулись к Луне (сегодня любой посетитель Смитсоновского музея может сделать то же самое).

Я в буквальном смысле слова впервые вдохнул запах лунных образцов зимой 1969–1970 гг., когда учился на старших курсах в MIT (Массачусетском технологическом институте), примерно через полгода после исторического полета «Аполлона-11». Образцы были получены 24 июля 1969 г., когда люди впервые ступили на поверхность Луны и вернулись обратно на Землю. В ту начальную эпоху освоения Луны из-за опасения занести инопланетные микроорганизмы космонавты и образцы лунных пород были подвергнуты строжайшему карантину. Вскоре после того, как их модуль опустился в Тихом океане вблизи Гавайев, Нил Армстронг, Базз Олдрин и Майк Коллинз с бесценным грузом, состоявшим из 21 кг лунных горных пород и грунта, поднялись на борт американского военного корабля Hornet и вместе со всей коллекцией были размещены в герметичной передвижной карантинной установке НАСА. С Гавайских островов их доставили в Хьюстон в специально созданную Лунную приемную лабораторию, где космонавты и их бесценные образцы содержались почти три недели на тот случай, если они действительно подхватили на Луне какое-нибудь опасное заболевание.

В течение последующих трех лет полеты по программе «Аполлон» совершались один за другим. Лунный модуль «Аполлона-12» под названием Intrepid («Неустрашимый») с космонавтами Чарльзом Конрадом-младшим и Аланом Бином опустился на Луну 19 ноября 1969 г. и неделю спустя вернулся на Землю с 32 кг образцов горных пород и грунта; космонавты вместе с грузом были помещены в Хьюстонскую карантинную установку. По счастливой случайности, мой научный руководитель, умнейший и энергичнейший Дэвид Воунз стал членом научно-исследовательской группы по предварительному изучению лунных образцов с «Аполлона-12». Этот небольшой коллектив ученых получил уникальную возможность тщательно исследовать вторую партию лунных образцов с помощью самых передовых технологий. Специальностью Дейва была петрология магматических пород — изучение происхождения горных пород, образовавшихся из магмы. Все образцы, достав-

ленные «Аполлоном-11» и «Аполлоном-12», оказались вулканического происхождения, так что Дейв пребывал на седьмом геологическом небе.

В некоторых отношениях работа оказалась отнюдь не легкой: они, по существу, находились в заключении, и над ними довлела необходимость получить достоверные данные о едва ли не самых дорогостоящих и значимых образцах, когда-либо собранных. С другой стороны, их невероятно воодушевляло то, что они оказались среди первых представителей человечества, работающих с образцами горных пород и грунтом инопланетного происхождения — космической материей, которая наконец объяснит нам происхождение Луны.

Мое первое знакомство с Луной произошло, когда Дейв вернулся в MIT. Помню, как открылись двери лифта на 12-м этаже Зеленого корпуса. И вот появился Дейв, невысокий очкарик в сопровождении двух здоровенных, вооруженных охранников в форме агентов ФБР. Они, конечно, охраняли не столько Дейва, сколько лунные образцы, которые на тот момент могли стоить миллионы долларов на рынке коллекционеров. Учет велся до миллиграмма. Дейв выглядел усталым и напряженным: он долгое время провел в командировке, находился под постоянным наблюдением, и работа была далека от завершения.

Когда речь заходит о лунных образцах, большинство представляет их себе как нечто увесистое, вроде камней, что можно подержать в руках. Но большая часть материала, доставленного «Аполлонами», состояла из лунного грунта, реголита. Мелкозернистые частицы реголита являются рыхлой породой, раскрошившейся на такие мелкие фрагменты, что их трудно разглядеть даже под микроскопом — следствие космических атак: от ударов увесистых метеоритов до непрерывного воздействия солнечного ветра. Эта сверхмелкая пудра обладает необычными свойствами, например, липнет ко всему, к чему прикоснется, как красящий порошок для ксерокса. Дейву предстояло пересыпать часть этой пудры из флакона размером с небольшой стакан в три-четыре баночки размером примерно с паль-

чиковую батарейку, чтобы распределить по соседним лабораториям.

Вроде бы задача нетрудная. Высыпьте порошок из флакона на листок гладкой бумаги. Осторожно пересыпьте ложечкой небольшие порции порошка в маленькие баночки. Дейв сотни раз проделывал такие операции, и это не должно было занять больше минуты. Но здесь слишком велика была ответственность. По бокам его стояли два угрюмых охранника, да в придачу кучка любознательных студентов. И вот, когда Дейв наклонил флакон, рука у него слегка дрогнула. Порошок прилип к стенкам и не высыпался. Дейв постучал по флакону указательным пальцем. Ничего. Снова постучал. И вдруг вся эта драгоценная лунная пыль (на самом деле всего лишь небольшая кучка размером с шоколадный трюфель, но в тех обстоятельствах она показалась огромной) высыпалась сразу — пуфф! Пыль разлетелась, налипла Дейву на пальцы и просыпалась через край бумаги на стол. По-моему, все мы вдохнули вместе с воздухом распыленные частички. Никто не произнес ни слова.

Ничего катастрофического не произошло, пыль сохранилась почти полностью, в конце концов, благополучно перекочевала в баночки, и федеральные агенты удалились, чтобы доставить их в соответствующие лаборатории. В общем, это было забавно. Пару дней спустя мы аккуратно заключили в рамку восьмисантиметровый квадратный кусок бумаги с отчетливым отпечатком Дейвова пальца в лунной пыли и повесили «картину» над лабораторным столом, на котором все это приключилось.

Вслед за первой последовали другие посадки «Аполлонов» на Луну. Самым грандиозным оказался в декабре 1972 г. полет «Аполлона-17», доставившего более 110 кг образцов из долины Таурус-Литтров, предполагаемой области вулканической деятельности. Это был последний полет; в последующие четыре десятилетия никто не высаживался на поверхность Луны. Как бы то ни было, образцы лунного грунта, тщательно сохраняемые в стерильных хранилищах Дома лунных образцов в Космическом центре НАСА в Хьюстоне (для надежности

на базе ВВС в Сан-Антонио, штат Техас, хранится запасная коллекция), продолжают привлекать пристальное внимание ученых и предоставляют им богатый материал для исследований.

Несколько лет спустя после завершающей миссии «Аполлона» именно эти образцы послужили отправной точкой моего послужного списка, когда я получил свою первую должность в качестве исследователя-стажера в Геофизической лаборатории Института Карнеги. В мои задачи входило исследование различных видов «лунных частиц» с «Аполлона-12», «Аполлона-17» и «Луны-20» (одной из трех советских автоматических межпланетных станций, доставившей 55 г лунного грунта). Лунная пыль состояла главным образом из частиц размером с шарики или песчинки, и я должен был просматривать тысячи этих частиц, одну за другой. Я проводил целые часы за микроскопом, всматриваясь в эти изумительные зеленые и красные кристаллики и крошечные золотистые шарики, похожие на цветное стекло, — осколки разрушенных взрывом горных пород, которые на протяжении миллиардов лет подвергались метеоритному обстрелу.

Отобрав несколько дюжин перспективных крупинок, я подвергал каждую необычную частицу трем видам анализа. Вначале я использовал монокристаллическую рентгеновскую дифракцию, чтобы определить, с каким типом кристаллов я имею дело. Чаще всего мне попадались обычные разновидности оливина, пироксена и шпинели. Если мне встречался интересный кристалл, я тщательно ориентировал его грань и измерял спектр оптического поглощения (способность кристалла поглощать световые волны различной длины). Например, зеленые кристаллы оливина обычно поглощают волны красной области спектра; красные кристаллы шпинели, напротив, больше поглощают волны зеленого цвета. Я также измерял спектр необычных стеклянных частиц, прослеживая выбросы и колебания оптического спектра, которые указывали на присутствие редких элементов — например, хрома или титана. Небольшой скачок в 625 нм, еле заметное поглощение в оранжево-красной части спектра, характерное для лунного хрома, но не для хрома,

который встречается на Земле, становилось памятным открытием.

По завершении рентгеновской и оптической обработки я брался за фантастический прибор под названием электронный микрозонд, чтобы определить точное соотношение элементов в моих образцах. Раз за разом я подтверждал то, что уже отмечалось до меня: минералы с поверхности Луны, в целом подобные аналогичным веществам на Земле, в деталях существенно отличаются от них. Например, в них содержится гораздо больше титана; различны они и по содержанию хрома.

Эти и ряд других данных, полученных при исследовании образцов, существенно ограничили круг теорий происхождения Луны. Прежде всего обнаружилось, что Луна значительно отличается от Земли, в частности, гораздо меньшей плотностью; она не обладает твердым, плотным железо-никелевым ядром. Ядро Земли составляет почти треть массы планеты, в то время как ядро Луны едва достигает 3% от ее массы. Во-вторых, в лунных породах практически не встречается летучих элементов — тех, что испаряются в момент нагревания. В лунной пыли отсутствуют такие распространенные на Земле элементы, как азот, сера и водород. Их отсутствие означает, что в отличие от Земли, покрытой жидкой водой и изобилующей такими насыщенными водой веществами, как глина или слюда, среди минералов, доставленных с Луны «Аполлонами», не обнаружено веществ, содержащих воду. По каким-то причинам поверхность Луны подверглась взрыву или спеканию, что уничтожило летучие элементы, в результате чего Луна отличается крайней сухостью.

Третьим важнейшим фактором, обнаруженным в результате полетов «Аполлонов», стал кислород, точнее, распределение его изотопов. Каждый химический элемент определяется числом положительно заряженных протонов в его ядре. Это число всегда уникально: например, кислород известен как «атом с восемью протонами». Кроме того, атомные ядра содержат другой вид элементарных частиц — не несущие электрического заряда нейтроны. Более 99,7% всех атомов кислорода во Вселенной

имеют в составе ядра восемь нейтронов (вместе с восемью нейтронами они составляют изотоп, известный как кислород-16), а более редкие изотопы с девятью или десятью нейтронами (кислород-17 и кислород-18) исчисляются долями процента.

Кислород-16, кислород-17 и кислород-18 практически одинаковы по химическим свойствам (можно дышать любым, не ощущая никакой разницы), но отличаются по массе. Кислород-18 тяжелее кислорода-16. Соответственно при переходе кислородосодержащих соединений в другое состояние, например из твердого в жидкое или из жидкого в газообразное, менее массивный кислород-16 может удаляться гораздо быстрее. В период бурного рождения Солнечной системы такие переходы из одного состояния в другое совершались сплошь и рядом, что привело к изменению количества изотопов кислорода. Выяснилось, что соотношение кислорода-16 и кислорода-18 отличается на разных планетах и зависит от удаленности планеты от Солнца в момент ее формирования. Образцы лунного грунта показали, что пропорции изотопов кислорода на Луне и на Земле практически одинаковы. Иными словами, Луна и Земля в момент формирования находились почти на одном расстоянии от Солнца.

Как же сказались все эти открытия на трех соперничающих гипотезах о происхождении Луны? С самого начала под большим сомнением находилась теория совместного образования Земли и Луны из одного протопланетного сгустка, или совместной аккреции. Если бы Луна образовалась из остатков земного вещества, тогда их строение было бы примерно одинаково. Конечно, Луна схожа с Землей в том, что касается изотопов кислорода, но теория совместного формирования не в состоянии объяснить фундаментальные различия в содержании железа и летучих веществ. В целом состав лунного вещества значительно отличается от земного.

Различие в составе вещества ставит неразрешимые проблемы и перед гипотезой захвата. Теоретические модели движения планет предполагают, что захваченная планетезималь должна была сформироваться примерно на том же расстоянии

от Солнца, что и Земля, а значит, совпадать с ней по составу. Луна не совпадает. Конечно, небесное тело размером с Луну могло образоваться и в другой части газово-пылевого облака и уже потом приблизиться к земной орбите, но компьютерное моделирование орбитальной динамики подсказывает, что в этом случае Луна должна была обладать высокой скоростью относительно Земли, а значит, и сценарий захвата тоже не выдерживает критики.

Остается Джордж Говард Дарвин и его теория разделения. Она успешно объясняет как сходство в соотношении изотопов кислорода (Земля и Луна являются единой системой), так и различие в содержании железа (ядро Земли к тому моменту уже сформировалось; сгусток вещества, образовавший Луну, представлял собой часть уже расслоившейся, бедной железом мантии Земли). Она прекрасно согласуется с тем, что Луна постоянно повернута к Земле одной стороной: вращения Луны вокруг Земли и вокруг собственной оси синхронны и совпадают по направлению движения. Однако при этом остается нерешенной важная проблема: куда же исчезли летучие элементы, отсутствующие на Луне?

Против теории разделения свидетельствуют и общие законы физики. Примерно ко времени программы «Аполлон» компьютерное моделирование формирования планет достигло такого уровня, что позволило теоретикам с уверенностью исследовать динамику быстрого вращения жидких сфероидов, равных по размеру Земле. Коротко говоря, разделение не может произойти. Гравитационная сила Земли слишком велика, чтобы позволить сгустку расплавленной породы оторваться и выйти на собственную орбиту. По существу, расплавленная Земля должна была бы вращаться вокруг собственной оси с невероятной скоростью, совершая полный оборот примерно за час, чтобы от нее оторвался равный Луне сгусток. Система Земля–Луна просто не обладает для этого достаточным моментом импульса.

Подведем итог: ни одна из трех господствующих теорий образования Луны не соответствует данным, полученным в результате полетов «Аполлона». Требуется иное объяснение.

Свидетельские показания лунного грунта

У хорошего планетолога всегда есть в запасе новая теория. Данные наблюдений, полученные по программе «Аполлон», опровергли все три распространенные до 1969 г. теории образования Луны, однако ученым не понадобилось много времени, чтобы выступить с новой гипотезой на основании неопровержимых фактов. Новые данные о строении Луны свидетельствовали по крайней мере об одном: Луна более или менее похожа на Землю. Она совпадает с Землей по соотношению изотопов кислорода и по наличию большинства имеющихся на Земле элементов, но есть резкое расхождение в количестве железа и летучих веществ. Эти данные следовало привести в соответствие с орбитальными характеристиками, тысячи лет известными науке: Луна вращается вокруг Земли в той же плоскости и в том же направлении, что и другие планеты Солнечной системы. Земля имеет небольшой угол наклона оси примерно 23° (что вызывает смену времен года). Луна всегда повернута к нам одной стороной.

Ранние теории образования Луны не уделяли достаточного внимания механике движения планет, не входящих в систему Земля–Луна, в том числе и поразительным исключениям в общем порядке Солнечной системы. Начать с того, что Венера вращается вокруг оси в направлении, противоположном вращению всех остальных планет. Это может показаться не столь существенным, но Венера совпадает по размерам с Землей, а вращается — не так! Еще более странная картина с Ураном, третьей по величине планетой, ось вращения которой повернута таким образом, что планета как бы «лежит на боку» относительно плоскости вращения, так что кажется, будто она катится по орбите вокруг Солнца. Наблюдаются странности и у спутников других планет. Тритон, крупнейший из спутников Нептуна, по размерам сравнимый с Луной, вращается под острым углом по отношению к орбите планеты и в направлении, противоположном всем остальным телам Солнечной системы.

Традиционная наука отличается одной особенностью, которая может обескураживать тех, кто не знаком с прави-

лами игры. С одной стороны, мы выстраиваем строгие теории, обобщая огромное количество разрозненных фактов. Например, все планеты и спутники вращаются вокруг Солнца в одном направлении и в одной плоскости, что указывает на их общее происхождение из одного газово-пылевого облака. Но затем мы обнаруживаем исключения из общего правила — и отбрасываем их как странные аномалии. Венера вращается в противоположном направлении? Тритон вращается в ином направлении? Не беда. Эти отклонения случайны по отношению к общей модели.

Подобным образом обстоит дело во многих научных областях, например в дискуссии о глобальном потеплении. Многие ученые утверждают, что изменения в атмосфере приведут к повышению средней температуры на планете на несколько градусов. Но подобные изменения могут вызвать сильнейшие ураганы в южной части США. Глобальное потепление может изменить океанские течения, например Гольфстрим, что, в свою очередь, сделает северную Европу намного холоднее, превратив ее в «холодильник» вроде Сибири. Такие противоречия вдохновляют противников теории глобального потепления. Ученые заявляют: «Происходит глобальное потепление, а у нас только что разразился сильнейший в истории снегопад». Что на это ответить? По здравом размышлении можно сказать, что природа удивительно разнообразна и отличается богатством, сложностью, многообразием взаимосвязей и длинной, запутанной историей. Любые отклонения, будь то орбиты движения планет или климат Северной Америки, нельзя рассматривать как неудобные мелочи: именно они важны для понимания того, что происходит на самом деле, как устроен мир. Мы выстраиваем грандиозные модели природных процессов, а затем используем странности и противоречия для уточнения несовершенной теории (если же исключения превосходят правило, мы создаем новую теорию). Вот почему настоящие ученые обожают всякие отклонения от правил. Если бы мы понимали все на свете и могли бы предсказать что угодно, не было бы смысла вставать по утрам и спешить в лаборатории.

Вернемся к происхождению Луны: именно отклонения от стандартных закономерностей, т. е. мелкие орбитальные аномалии, в середине 1970-х гг. привели к идее «Большого всплеска», или «Мощного удара». Вначале последовала серия взаимосвязанных, но слабо доказанных гипотез, которые затем объединились в коллективно выработанное представление, оформленное на знаменитой Гавайской конференции 1984 г., где собрались ведущие планетологи и сопоставили свои теоретические соображения. При таком стечении крупнейших умов возобладал принцип «бритвы Оккама»: наиболее правильным может быть простейшее решение проблемы, если оно согласуется с фактами. Теория «Мощного удара» вполне подходила.

Чтобы оценить эту революционную идею, надо вернуться на 4,5 млрд лет вспять, во времена, когда планеты только что образовались из планетезималей. На пути к нынешнему диаметру 12 742 км Земля, сталкиваясь с ближайшими небесными телами, поглотила большинство из них. Предпоследние столкновения с объектами диаметром сотни километров, должно быть, представляли собой эффектное зрелище, но практически не влияли на состояние Земли — гораздо более массивной протопланеты.

Но толчок толчку рознь. Одно достопамятное событие стоит особняком в истории Земли. Около 4,5 млрд лет назад, когда Солнечная система насчитывала около 50 млн лет от роду, почерневшая Протоземля оказалась в тесном соседстве с соперницей, лишь слегка уступавшей ей по размерам. Соперница (ее назвали Тейя, по имени богини, породившей Луну) вполне заслуживала статуса планеты, поскольку была, по-видимому, в два-три раза больше Марса и составляла приблизительно треть массы Земли. Закон астрофизики гласит, что две планеты не могут существовать вместе на одной орбите. В какой-то момент они неминуемо столкнутся, и побеждает всегда планета большего размера. Так и произошло при столкновении Земли с Тейей.

Исследователи использовали наглядное компьютерное моделирование, пытаясь представить, что могло произойти.

Столкновение предопределено законами физики, поэтому можно было испробовать тысячи различных моделей с всевозможными исходными условиями, чтобы выяснить, может ли таким образом сформироваться спутник. Ответ тесно связан с исходными параметрами: массой и строением Протоземли, массой и строением Тейи, сравнительными скоростями их движения, углом и местом столкновения. Большинство комбинаций не срабатывает — Луна не образуется. Но несколько моделей оказываются поразительно удачными и порождают систему типа Земля–Луна, подобную той, что имеется в действительности.

Одна такая комбинация демонстрирует ситуацию удара по касательной — крупная Тейя слегка накреняет еще более крупную Землю. Ситуация прокручивается в замедленном режиме, через взгляд из космоса. Момент контакта двух небесных тел вначале выглядит как легкий поцелуй. Затем через четыре-пять минут Тейя шлепается на Землю, как круглый комок мягкого теста на пол, без каких-либо видимых последствий для Земли. Десять минут спустя Тейя постепенно сплющивается, а Земля начинает терять округлую форму. Примерно через полчаса после столкновения Тейя просто исчезает, а Земля приобретает асимметричные очертания. Раскаленная порода испаряется и выбрасывается светящимися потоками из зияющей раны, затмевая картину деформации небесных тел.

Другой часто упоминаемый сценарий, предложенный в 1970-е гг. и усовершенствованный в течение двух последующих десятилетий, был разработан теоретиком Аластером Камероном в Гарвард-Смитсоновском научно-исследовательском центре астрофизики. Согласно его увлекательной теории, масса Тейи составляла примерно 40% массы Протоземли. Произошло боковое столкновение, но, по версии Камерона, Тейя, ударившись о Землю, отскочила растянутой каплей, а затем вновь была притянута гравитацией, получив coup de grâce — завершающий смертельный удар, после которого исчезла навсегда.

В обоих сценариях катастрофическое столкновение уничтожает Тейю, которая превращается в гигантское раскаленное

облако, температура которого составляет десятки тысяч градусов, и это облако вращается вокруг Земли. При этом сама Тейя тоже наносит Земле определенный ущерб. Порядочный кусок земной коры и мантии расплавляется и выбрасывается взрывом, смешиваясь на орбите с раскаленным облаком, оставшимся от Тейи. Некоторое количество вещества исчезает в глубоком космосе, но большая часть остатков вращается вокруг Земли, захваченная силой гравитации. В этом облаке металлы из ядер обеих планет смешиваются, охлаждаются до жидкой консистенции и погружаются в Землю, формируя новое, более крупное ядро. Вещества из мантий тоже смешиваются, образуя шарообразное облако из испарившихся минералов. Несколько дней или недель на Землю обрушивается нескончаемый дождь из раскаленных силикатных капель, падающих в безбрежный океан магмы. В итоге Земля захватила значительную часть того, что было Тейей, и стала более массивной.

Но отнюдь не вся Тейя была поглощена. Земля оказалась в окружении огромного количества расплавленных обломков горных пород, в основном из мантий обеих протопланет. Остывая, эти раскаленные капли вещества спекались, причем более мелкие частицы поглощались более крупными. Подобно когда-то образовавшимся планетам, под воздействием гравитационных сил быстро формировалась Луна, по-видимому, достигшая своего нынешнего размера всего за несколько лет.

Согласно физическим законам формирования планет, в общем, понятно, где должна была образоваться Луна. Всякое массивное тело имеет невидимую, окружающую его сферу, называемую пределом Роша, внутри которой силы тяготения настолько велики, что спутник там образоваться не может. Именно поэтому вокруг Сатурна имеются гигантские кольца, но нет никаких спутников на расстоянии ближе 80 000 км от его поверхности. Силы притяжения Сатурна препятствуют образованию спутников из ледяных частиц, составляющих его кольца.

Если исчислять предел Роша от центра вращающегося объекта, для Земли он составляет примерно 18 000 км,

или 11 600 км — от ее поверхности. Соответственно модели образования Луны помещают точку формирования спутника на допустимое расстояние от 24 000 км и далее, где обломки гигантского столкновения могут объединяться друг с другом, не рискуя быть разорванными гравитацией. Таким образом, согласно большинству теорий, Луна образовалась примерно 4,5 млрд лет назад. Земля обрела спутник, сформированный по большей части из ее собственных обломков.

Ученые охотно восприняли теорию гигантского столкновения, поскольку она объясняет большинство загадок лучше других моделей. В ядре Луны практически нет железа, поскольку большая часть железа Тейи была поглощена Землей. На Луне нет летучих веществ, поскольку летучие вещества Тейи были сметены взрывом в момент столкновения. Луна всегда обращена к Земле одной стороной, поскольку моменты импульса Земли и Тейи объединились в одной орбитальной системе.

Теория гигантского столкновения также объясняет аномальный наклон земной оси на 23° — фактор, не объясненный ни одной из предыдущих теорий. От удара Тейи Земля буквально завалилась на один бок. Вообще теория образования Луны в результате гигантского столкновения породила множество идей относительно других аномалий Солнечной системы. Возможно, такие столкновения происходят часто и даже закономерно. Возможно, этим объясняется «неправильное» вращение Венеры вокруг собственной оси, а также потеря ею такого количества воды. Возможно, и боковое вращение Урана тоже вызвано сравнительно недавним гигантским столкновением подобного рода.

Другое небо

Образование Луны сыграло решающую роль в истории Земли, и последствия этого события поистине удивительны, хотя только в последнее время стали привлекать внимание науки. Четыре с половиной миллиарда лет назад Луна сильно отличалась от того романтичного серебристого диска, который

мы наблюдаем сегодня. В те времена она являлась огромной, грозной и невообразимо опасной силой для околоземного пространства.

Все это связано с одним удивительным обстоятельством: Луна образовалась в каких-нибудь 24 000 км от поверхности Земли, т. е. на расстоянии полета от Вашингтона до Мельбурна, ныне же Луна располагается примерно в 382 000 км от нашей планеты. На первый взгляд, представляется невероятным, что гигантская Луна просто дрейфует в пространстве, удаляясь от Земли, но измерения не лгут. Астронавты с «Аполлона» установили зеркальные отражатели на поверхности Луны. Лазерные лучи с Земли, отражаясь в зеркалах, возвращаются на Землю, позволяя замерить расстояние с точностью до миллиметров. Год за годом, начиная с 1970-х, Луна неизменно отдаляется: в среднем примерно на 3,82 см в год. Вроде бы мелочь, но если помножить это расстояние на время, то с учетом нынешней скорости получается, что она удаляется от Земли примерно на 1,5 км в 40 000 лет. «Открутив запись назад», мы можем вычислить, на каком расстоянии от Земли она находилась 4,5 млрд лет назад.

Во-первых, Луна тогда выглядела совершенно иначе. На расстоянии 24 тыс. км Луна, диаметром 3,5 тыс. км, смотрелась настоящим гигантом, подобного которому мы не наблюдаем в наше время. Ее величина на небосводе составляла почти 8° — примерно в 16 раз больше видимого размера Солнца, а лунный диск закрывал на небе в 250 раз большую площадь.

Но и это еще не все. В то время Луна отличалась неистовой вулканической активностью и ничем не напоминала мирный серебристо-мерцающий объект, который мы созерцаем сегодня. С Земли можно было бы отчетливо наблюдать, как на ее черной поверхности полыхали кратеры вулканов и трещины, наполненные раскаленной магмой. Новорожденная полная Луна смотрелась бы впечатляюще, ее поверхность отражала в сотни раз больше солнечного света, чем сейчас. При свете той Луны можно было бы спокойно читать книгу, но это же обстоятельство помешало бы астрономическим

наблюдениям. Ее ослепительное сияние полностью затмевало бы звезды и планеты.

Усиливала впечатление и та скорость, с которой двигались вновь образованные тела. В космическом пространстве ничто не препятствует движению, поэтому вращение небесных тел может продолжаться миллиарды лет. Взаимосвязанные объекты вроде Луны с Землей обладают моментом импульса, величина которого зависит от двух круговых движений. Во-первых, это вращение Земли вокруг своей оси; чем быстрее это вращение, тем больше момент. А момент импульса Луны зависит прежде всего от расстояния и скорости ее обращения вокруг Земли. Вращение вокруг собственной оси особого значения не имеет.

Совокупный момент импульса системы Земля–Луна претерпел мало изменений за последние несколько миллиардов лет, но соотношение их движений изменилось существенно. В настоящее время момент системы Земля–Луна связан преимущественно с обращением Луны вокруг Земли, с учетом расстояния 382 тыс. км и орбитального периода 27 суток. Массивная Земля, расположенная в центре этой системы, совершая неторопливый 24-часовой поворот вокруг своей оси, составляет незначительную часть момента импульса Луны. (Аналогично в орбитальном движении отдаленных газовых планет-гигантов сосредоточен почти весь момент импульса Солнечной системы, хотя в Солнце сосредоточено 99,9% всей массы системы.)

Однако 4,5 млрд лет назад дело обстояло иначе. Поскольку Луна находилась всего в 24 000 км от Земли, все вращалось с головокружительной скоростью, подобно фигуристке, которая обхватывает себя руками, чтобы увеличить скорость вращения. Начать с того, что Земля совершала оборот вокруг своей оси всего за пять часов. Оборот вокруг Солнца и тогда составлял целый год (примерно 8766 часов); этот период не изменился за всю историю существования Солнечной системы. Но сам год вмещал более 1750 коротких дней, поскольку Солнце всходило и заходило каждые пять часов!

Такое предположение выглядит по меньшей мере странным и вряд ли доказуемым, но некоторые данные измерений подтверждают теорию короткого дня в древнейшем периоде истории Земли. Самым интригующим доказательством являются коралловые рифы. На некоторых видах кораллов отчетливо видны линии роста, которые отражают небольшой дневной прирост и хорошо выраженный годичный цикл. У современных кораллов наблюдаются 365 ежедневных линий за каждый год прироста. Однако у древних ископаемых кораллов девонского периода, т. е. росших примерно 400 млн лет назад, наблюдается более 400 линий ежедневного прироста за год, что указывает на более короткий суточный цикл планеты. В то время сутки длились примерно 22 часа, а Луна, по-видимому, располагалась на 16000 км ближе к Земле, чем теперь.

Другим дополнительным свидетельством являются «приливные ритмиты» — тонкослоистые осадочные породы, в которых запечатлены ритмы приливных волн, включая дневные, месячные и годичные циклы приливов. Микроскопические исследования приливных ритмитов возрастом 900 млн лет в каньоне Биг-Коттонвуд в штате Юта указывают на то, что в то время земные сутки равнялись 18,9 часа, а год состоял из 464 дней — 464 закатов и восходов. Расчетное расстояние между Землей и Луной в то время составляло 350 000 км, что подразумевает скорость удаления примерно равную сегодняшней — 3,91 см в год.

Безумный мир

Пока нет данных о приливных циклах Земли древнее миллиарда лет назад, но можно с уверенностью утверждать, что 4,5 млрд лет назад все было гораздо более стремительным и «необузданным». Тогда не только сутки на Земле составляли пять часов, но и находящаяся в непосредственной близости Луна обращалась по орбите вокруг Земли гораздо быстрее. Чтобы обернуться вокруг Земли, Луне требовалось всего 84 часа — 3,5 сегодняшних суток. С такими скоростями вращения Земли

и Луны привычный лунный цикл, состоящий из новолуния, убывающей Луны, полнолуния и ущербной Луны, совершался с фантастической быстротой: на каждую новую фазу приходилось несколько пятичасовых суток.

Это сопровождалось множеством последствий, как благоприятных, так и не очень. Луна занимала такое большое пространство в небе и так быстро вращалась на околоземной орбите, что это вызывало частые затмения. Полное солнечное затмение происходило каждые 84 часа, практически в каждое новолуние, когда Луна оказывалась между Землей и Солнцем. Солнечный свет полностью исчезал на несколько минут, зато на черном небе отчетливо светились звезды и планеты, а на фоне черного лунного диска ярко выделялись огненные вулканы и океаны магмы. Регулярно происходили и лунные затмения — как по расписанию, каждые 42 часа. Во время полнолуния, когда Земля располагалась прямо между Солнцем и Луной, огромная тень Земли полностью скрывала гигантский сверкающий лик Луны. И вновь на черном небе появлялись звезды и планеты, пока Луна готовила свое огненное шоу.

Гораздо более грозным последствием близости Луны были чудовищные приливы. Если бы Земля и Луна были абсолютно твердыми телами, они и сегодня находились бы точно в том же положении, что и 4,5 млрд лет назад: располагались на расстоянии 24 000 км друг от друга, вращались вокруг оси и на своих орбитах с той же скоростью и испытывали частые солнечные и лунные затмения. Но ни Земля, ни Луна не отличаются абсолютной твердостью. Их породы могут изгибаться и собираться в складки, особенно в расплавленном состоянии, они вздымаются и опадают под воздействием приливов. Молодая Луна, находясь на расстоянии 24 000 км от Земли, обрушивала на нее невероятные приливные силы, почти равные тому гравитационному воздействию, которое оказывала Земля на расплавленную лунную поверхность. Трудно даже вообразить, какими магматическими волнами это сопровождалось. Каждые несколько часов расплавленная магма на поверхности Земли вспухала гигантскими волнами высотой больше километра

по направлению к Луне, что сопровождалось невероятным внутренним трением и неизбежно вело к повышению температуры и длительному сохранению коры в жидком состоянии, чего не могло бы быть у планеты без такого соседа. В свою очередь, гравитационные силы Земли заставляли вспучиваться поверхность Луны, обращенную к Земле, вызывая деформацию шарообразной формы нашего спутника.

Именно эти приливные деформации и заставляют Луну удаляться от нашей планеты. Как случилось, что объект диаметром 3500 км отнесло от Земли с расстояния всего 24 000 км до целых 382 400 км? Ответ заключается в сохранении совокупного момента импульса — постоянной суммы моментов Земли и Луны. Согласно законам физики, исходный момент импульса системы Земля–Луна должен практически полностью сохраняться вплоть до нынешнего времени.

Четыре с половиной миллиарда лет назад гигантские приливы сотрясали планету Земля каждые несколько часов. Однако Земля вращалась вокруг своей оси гораздо быстрее (полный оборот совершался за пять часов), чем вокруг нее вращалась Луна (полный оборот совершался за 84 часа), приливное вспучивание за счет большей массы постоянно воздействовало на Луну всей силой тяготения, с каждым оборотом перенося момент импульса от Земли к Луне. Около 400 лет назад немецкий математик Иоганн Кеплер впервые сформулировал непреложные законы движения планет, в соответствии с которыми чем больше орбитальный момент импульса спутника, тем дальше он должен располагаться от основной планеты. И вот с каждым оборотом Луна неумолимо удаляется от Земли.

Одновременно с воздействием приливных сил Земли на Луну деформированная Луна оказывала аналогичное обратное воздействие, заставляя Землю замедлять вращение вокруг собственной оси. Здесь и срабатывает момент импульса. Чем быстрее Луна обращается по орбите, тем больше она удаляется от Земли и, следовательно, тем больше момента импульса она забирает. Чтобы компенсировать потерю, Земля вынуждена все медленнее вращаться вокруг своей оси, сохраняя

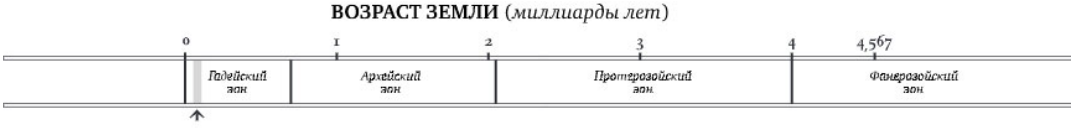
таким образом суммарный момент системы Земля–Луна: снова представьте себе фигуристку, разводящую на этот раз руки в стороны, чтобы замедлить вращение. За 4,5 млрд лет вращение Земли вокруг оси замедлилось от пяти часов до 24, а Луна тем временем удалялась все больше и забирала значительную долю общего момента.

Отнюдь не все системы планета–спутник ведут себя аналогично. Если основная планета вращается вокруг оси медленнее, чем ее спутник на орбите, возникает неизбежный эффект торможения. Приливные волны планеты отстают от ее вращения; движение спутника по орбите тормозится, и с каждым оборотом он сближается с планетой. В конечном итоге спутник по спирали опустится на планету и либо будет поглощен ею, либо произойдет нечто вроде гигантского столкновения. Возможно, именно по этой причине Венера с ее обратным вращением не имеет спутника. По-видимому, катастрофическое обрушение на нее ее собственного спутника некогда вызвало потерю значительной части воды и превратило ее во враждебный, безводный, обжигающий, безжизненный мир.

В начале существования системы Земля–Луна обмен угловыми моментами от замедляющей вращение Земли к ускоряющейся Луне происходил гораздо в более солидных масштабах. В первые века после формирования Луны оба небесных тела были опоясаны океанами бурлящей магмы, которые подвергались растяжению и деформации. Гигантские приливные волны на Земле и подобные им на Луне, вероятно, заставляли Луну удаляться на тысячи метров в год, в то время как вращение Земли неуклонно замедлялось относительно первоначальной неистовой скорости. Но такие огромные приливы расплавленной земной поверхности не могли продолжаться долго. По мере увеличения расстояния между Землей и Луной приливные силы уменьшались, причем увеличение расстояния вдвое вызывало уменьшение гравитационных приливных сил в 8 раз. С ростом расстояния втрое приливы уменьшалась в 27 раз.

Приливные потрясения происходили все реже и не могли препятствовать отвердению планетных тел. За несколько миллионов лет после гигантского столкновения поверхности Земли и Луны превратились в черную твердь. Земные приливы — деформация твердых пород — по-прежнему происходили достаточно часто в ту давнюю пору, но уже мало напоминали гигантские ежедневные волны магмы былых времен.

Светящаяся Луна напоминает нам, что космос — это пространство, в котором созидание переплетается с разрушением. Мы по сей день не застрахованы от возможных космических катастроф: астероиды-убийцы и гигантские кометы все еще время от времени пересекают земную орбиту. Миллионы лет назад один такой крупный булыжник из космоса уничтожил динозавров; через миллионы лет после нас другие каменные гости вполне могут обрушиться на Землю. Если мы хотим выжить как вид, нам надо внимательнее вглядываться в небеса, где наш ближайший космический сосед молча напоминает: конечно, все меняется медленно и постепенно, но в космических просторах случается всякое.



Глава 3

Черная Земля

Первичная базальтовая кора

Возраст Земли: от 50 до 100 млн лет

Земля испытала немало превращений за долгую историю своего существования. Гигантское столкновение было, по-видимому, самым разрушительным и (с учетом формирования Луны) обусловившим далекоидущие последствия. Но такой результат — образование огромного единичного спутника на орбите вокруг планеты, полной летучих веществ, отнюдь не является неизбежным следствием законов физики и химии. Окажись параметры того древнего столкновения Тейи с Землей слегка иными, процесс, приведший к формированию Луны, происходил бы совершенно по-другому. Если бы столкновение произошло не по касательной, а лобовым ударом по центру, то Тейя смешалась бы с Землей и стала ее частью. Весьма вероятно, в таком случае Земля и Тейя образовали бы большую планету без спутника. Тейя могла бы также разминуться с Землей, а ее орбита изменилась бы настолько, что направилась бы либо в сторону Венеры, либо Марса и навсегда удалилась бы от Земли. Наконец, удар по касательной мог прийтись под таким незначительным углом, что образовавшееся облако осколков сформировало бы вокруг Земли множество более мелких лун, которые украсили бы ночное небо над Землей.

В изменчивых космических просторах случай играет немаловажную роль. История Солнечной системы представляет собой длинный перечень состоявшихся и несостоявшихся столкновений. Астероид, погубивший на Земле динозавров, вполне мог разминуться с нашей планетой и в результате позволил бы тираннозаврам и их потомкам просуществовать еще десятки миллионов лет. Большеголовые птицы достигли бы развитого интеллекта и научились бы изготовлять орудия труда и охоты. А малорослые млекопитающие, особенно расплодившиеся в мезозойскую эру, не достигли бы ничего. Чуть-чуть в сторону — и Земля пошла бы по другому пути развития.

Но некоторые процессы в космосе неизбежны и предопределены. С момента Большого взрыва Вселенная заполнилась множеством протонов и электронов и соответственно — большим количеством водорода и гелия. Огромные резервы водорода и гелия с неизбежностью привели к формированию звезд. Все остальные элементы возникли так же неизбежно в результате термоядерного синтеза и появления сверхновых после взрыва насыщенных водородом звезд. В свою очередь, все типы планет, вроде Земли, Марса, Юпитера и многих других, известных и вновь открываемых на орбитах далеких звезд, образовались в результате взаимодействия исходных химических элементов.

Земля после столкновения с Тейей пережила бурные времена охлаждения и самоупорядочения. Что представляла собой эта новорожденная планета? Геологи окрестили первые 500 млн лет ее существования гадейским эоном, намекая на адские условия того периода. Размышляя над этим названием, можно вообразить впечатляющую картину Земли в гадейскую эпоху: сернистые испарения вулканов, потоки огненной лавы и беспрерывные атаки метеоритов и комет терзали тогда поверхность Земли. Тем не менее вряд ли можно восстановить подробности существования Земли в эти первые сотни миллионов лет, поскольку отсутствуют сколько-нибудь достоверные данные о них.

Мы многое знаем о происхождении Земли благодаря свидетельствам образования Солнечной системы — самого Солнца

и множества объектов, связанных с ним гравитационными силами. Десятки тысяч метеоритов дают достаточное представление об эпохе планетезималей. Подробности происхождения Луны обнаруживаются в лунных горных породах и грунте. Но от первых дней существования Земли не осталось ничего, по крайней мере никаких следов на самой Земле. Ни обломка породы, ни грана вещества.

Удивительно, но такие данные можно было бы извлечь из метеоритов, выброшенных из древнейших слоев Земли во время мощных столкновений миллиарды лет назад, а затем вновь упавших на Землю или на ее спутницу Луну. Наверняка такие образцы существуют, и даже во множестве, причем некоторые из них могут сохраниться в первозданном виде. На самом деле поиск таких реликтов, сохранившихся с начальной эпохи существования Земли, рассматривался в качестве одного из обоснований для повторных экспедиций на Луну. Подробная геологическая съемка лунной поверхности могла бы способствовать поискам гадейских горных пород, чтобы пролить свет на недосягаемое прошлое Земли.

Но даже и без таких приятных находок, дающих возможность подержать в руках обломок одного из первых затвердевших горных пород с поверхности Земли, у нас остаются шансы. Земля, конечно, менялась неоднократно, но законы химии и физики не меняются. Четыре с половиной миллиарда лет назад точно так же господствовали эти законы, и никакие гигантские столкновения или иные катаклизмы планетного масштаба не могут их изменить.

Неизбежность взаимодействия элементов

Развитие Земли в начальный период явилось следствием двух взаимосвязанных химических аспектов: космохимии (возникновение элементов) и петрохимии (возникновение горных пород). Вначале была космохимия и звездное производство, породившее все тяжелые элементы: всю Периодическую таблицу после водорода и гелия, занимающих первые два

места в первом ряду. В нашей Вселенной главная роль принадлежала таким элементам, как кислород, кремний, алюминий, магний, кальций и железо, которые значительно преобладали над всеми остальными тяжелыми элементами, особенно на твердотельных планетах земного типа. Эти шесть элементов составляют 98% массы Земли, а также Луны, Меркурия, Венеры и Марса.

За каждым из элементов «большой шестерки» стоит особая химическая история. Каждый по-своему внес вклад в развитие Земли после гигантского столкновения. Ключом ко всему являются химические соединения. Напомню, что атомы соединяются друг с другом, когда окружающие их облака электронов вступают во взаимодействие и образуют более устойчивые соединения, а именно: атомы с магическим числом из двух, десяти или 18 электронов. Для осуществления такого обмена одни атомы должны отдать свои электроны, а другие — принять их.

На Земле главным акцептором электронов является кислород. В ядре каждого атома кислорода содержится восемь положительно заряженных протонов, которые уравновешиваются восемью отрицательно заряженными электронами. Но кислород находится в постоянном поиске двух дополнительных электронов, которые составили бы магическое число десять. Эта ненасытная нужда превращает кислород в один из самых химически активных и агрессивных газов в природе. Противное вещество, что ни говори.

Для большинства из нас кислород представляется главным образом как важная часть атмосферы: около 21%, которые поддерживают нашу жизнь. Но его нынешняя счастливая роль в атмосфере — это результат сравнительно недавних событий в истории Земли. По крайней мере в первые два миллиарда лет земная атмосфера была напрочь лишена кислорода. И по сей день большая часть земного кислорода содержится в горных породах и минералах — 99,9999% от их общего состава. Поднимитесь на какой-нибудь величественный скалистый горный пик или пройдите по продуваемой всеми ветрами высокогорной тропе — большая часть атомов у вас под ногами — это кис-

лород. Когда вы лежите на песчаном пляже, два из трех атомов под вами — тоже кислород.

Предоставляя кислороду роль главного химического акцептора, существует множество атомов, готовых поделиться с ним своими электронами. Самым обильным поставщиком электронов является кремний, составляющий примерно четверть всех атомов в земной коре и мантии. В ядре кремния содержится 14 положительно заряженных протонов, уравновешенных 14 отрицательно заряженными электронами. Обычно кремний отдает четыре электрона, достигая магического числа десять электронов, и становится ионом кремния с положительным электрическим зарядом. В земной коре и мантии эти четыре отпущенных на волю электрона почти всегда поглощаются двумя атомами кислорода, превращая их в отрицательно заряженные ионы. Вследствие этого во многих горных породах встречаются соединения с сильными кислородно-кремниевыми связями, например, кварц, или SiO_2, — союз одного атома кремния с двумя атомами кислорода. Твердые, прозрачные зерна кварца существуют с давних времен. Прибрежные залежи кварцевых песчинок исчисляются триллионами, в настоящее время кварц является самым распространенным минералом песчаных пляжей. Возможно, вы встречали в магазинах красивые, хорошо ограненные, прозрачные кристаллы кварца, продаваемые как «магические кристаллы». Держа в руках такое сокровище, вспомните, что оно на две трети состоит из кислорода.

Кристаллические кремниево-кислородные соединения под общим названием силикаты являются самыми распространенными минералами на Земле; известно более 13 тыс. разных видов (и почти каждый месяц выявляются все новые). Они отличаются большим разнообразием атомной структуры и свойств благодаря многообразию связей между кремнием и кислородом, будь то крепкие, устойчивые к атмосферному воздействию породы (например, кварц или полевой шпат), или зерна полудрагоценного зеленого оливина и красного граната (символические камни для родившихся в августе и январе), или игольчатые цепные силикаты, часть из которых является

не чем иным, как знаменитый асбест, или тонкопластинчатые минералы, например слюда, некогда использовавшаяся вместо стекла в окнах.

Вещества, менее распространенные, чем кремний, такие как кальций, магний и алюминий, тем не менее играют ключевую роль в строении самых главных силикатных горных пород, встречающихся повсюду в земной коре и мантии. Будучи положительно заряженными ионами, подобно своим более часто встречающимся двоюродным братьям — силикатам, они тоже могут иногда соединяться с кислородом, образуя такие формы, как оксид кальция, известный как негашеная известь, или «кипелка»; довольно редкий оксид магния (магнезия); а также оксид алюминия, который в соединении со следовыми количествами таких редких элементов, как хром или титан, образует драгоценные камни — рубин и сапфир.

Шестой элемент из числа важнейших — железо — является самым «гибким» из всех. Остальные пять (кислород, кремний, алюминий, магний и кальций) отличаются определенным постоянством химических свойств. Кислород почти всегда выступает акцептором двух электронов, кремний почти всегда является поставщиком четырех электронов, алюминий отдает три электрона, а магний и кальций — по два. В отличие от них, железо, 26-й элемент в периодической таблице, выступает в трех совершенно разных химических ипостасях.

Разносторонность железа демонстрирует многослойная структура Земли. Железо составляет каждый десятый атом в богатых кислородом земной коре и мантии, тогда как металлическое ядро Земли на целых 90% состоит из железа. Этот резкий контраст связан с тем, что 26 электронов этого элемента слишком заметно превышают оптимальное число восемнадцать, а потому железо главным образом выступает в качестве поставщика электронов. Ни одно вещество не примет восемь электронов сразу, так что железу приходится взаимодействовать с любым первым встречным акцептором.

Иногда железо действует подобно магнию и отдает два электрона, становясь двойным положительно заряженным ионом.

В таком двухвалентном состоянии железо придает зеленовато-голубоватый оттенок многим минералам и химическим соединениям. Верным признаком наличия двухвалентного железа является, например, зеленый цвет драгоценного камня перидота (оливин с примесью железа) или голубовато-зеленый оттенок бедной кислородом крови в наших венах. В этом виде железо соединяется с кислородом в пропорции один к одному. Атомы железа и магния сопоставимы по размеру, а потому эти вещества нередко свободно замещают друг друга в самых распространенных минералах земной коры. Некоторые часто встречающиеся минералы, включая оливин, гранат, пироксен и слюду, имеют разновидности, в зависимости от содержания в них магния и железа: от бесцветных вариантов, со 100%-ным содержанием магния, до густо окрашенных, где 100% составляет двухзарядное железо.

Однако железо встречается не только в двухвалентном виде. В присутствии достаточного количества акцепторов электронов оно охотно отдает третий электрон и становится трехзарядным положительным ионом. Трехзарядная форма железа придает соединениям характерный кирпично-красный цвет. Красная ржавчина, краснозем, красные кирпичи и насыщенная кислородом кровь обязаны своими оттенками трехвалентному железу. Подобно алюминию, который тоже принимает три положительных заряда, трехвалентное железо соединяется с кислородом в пропорции два к трем и образует Fe_2O_3 — широко известный минерал гематит, названный так из-за присущего ему кроваво-красного цвета. Если магний вступает вместо железа в двухзарядные соединения, то алюминий часто замещает трехвалентный вариант железа. Соотношения алюминия и железа в таких минералах, как гранат, амфибол и слюда, бывают самые разные, при этом богатые железом разновидности отличаются красным цветом вместо зеленого.

Итак, удивительная способность переходить из двухзарядного в трехзарядное состояние (мы еще вернемся к этой его способности спустя пару миллиардов лет, когда на Земле предположительно зародилась жизнь) позволяет железу в двухва-

лентном или трехвалентном обличье вести себя подобно другим веществам большой шестерки. Но постойте — железо обладает еще одной важнейшей способностью: оно легко превращается в металл.

Большая часть описанных до сих пор химических соединений обменивается электронами, превращаясь в ионы. Алюминий, магний, кальций и железо отдают электроны, кислород их принимает. Соответственно такие соединения называются ионными. Однако металлы образуются иным путем. Каждый атом металла отдает один или несколько электронов и обретает положительный заряд. Но эти отторгнутые электроны образуют вокруг металла нечто вроде вязкого, отрицательно заряженного «моря», которое удерживает все положительно заряженные атомы вместе, как дробинки в патоке. Железо в форме металла представляет собой огромное скопление атомов, совместно владеющих свободными электронами.

Такое коммунальное хозяйство весьма продуктивно. Начать с того, что электроны, находящиеся в общем владении, свободно передвигаются, что делает металлы прекрасными проводниками электричества (электричество, собственно, и представляет собой направленный поток электронов). Для сравнения: в ионах, состоящих из кислорода и алюминия или магния, каждый электрон закреплен на своем месте так прочно, что поток электричества невозможен. Другим следствием металлических соединений является то, что такие вещества преимущественно гнутся, а не ломаются. «Электронное море», окружающее атомы, можно сворачивать и закручивать, не умаляя его совместной силы, в отличие от хрупких камней и минералов.

Внимательный читатель наверняка уже заметил, что не только железо способно образовывать металлы. Банки из алюминия, фольга, электропроводка всем известны; сплавы из металлического магния широко применяются в высокотехнологичных гоночных автомобилях и игрушках; в основе большинства электронных устройств используются полуметаллы (металлоиды) на основе кремния (отсюда Кремниевая долина). Но все эти металлические виды алюминия, магния и кремния явля-

ются продуктами современного химического производства. На то, чтобы отделить их от кислорода, уходит много энергии, и в виде металлов они практически не встречаются в природе.

Железо гораздо меньше привязано к кислороду и свободнее входит в самые разные соединения. В отличие от кремния, алюминия, магния или кальция, оно спокойно вступает во взаимодействие с любыми акцепторами электронов, особенно с серой (блестящий пирит является сульфидом железа), а также с медным колчеданом. В отличие от других элементов, железо легко образует плотный металл, который оседает в глубине планет и формирует их массивное ядро.

Расплавленная Земля

Большая шестерка элементов, каждый из которых является неизбежным результатом взрывающихся звезд и эволюции планет земного типа, лежит в основе разнообразных горных пород на Земле. Их химические свойства обусловили необратимый ход преобразований, приведших к современному состоянию мира. Однако прежде образования горных пород Земля должна была остыть.

Попробуйте еще раз представить бурные времена, последовавшие за гигантским столкновением, в результате которого образовалась Луна. В первые дни, а может, и недели после столкновения то, что стало впоследствии Землей и Луной находилось в неупорядоченном состоянии. В то время ни Земля, ни Луна не имели твердой поверхности. Они представляли собой два шарообразных тела, покрытых океаном магмы, кипящей, раскаленной, поливаемой дождем расплавленного кремния, и все это при температурах, превышающих многие тысячи градусов.

По мере освобождения от остатков Тейи жар, подобный жару доменной печи, поднимался от Земли в холодный вакуум космоса, и внешняя оболочка планеты неуклонно остывала. При этом космические силы старались как можно дольше сохранять земную поверхность в расплавленном состоянии.

Огромные астероиды продолжали обстреливать планету. Каждый такой удар добавлял тепловой энергии, дополнительно раскаляя область столкновения, что препятствовало образованию устойчивой коры. Приливные силы Луны, располагавшейся на близком расстоянии, также вносили свою лепту в поддержание поверхности Земли в жидком состоянии, поскольку каждые пять часов вокруг планеты вспухала бурная волна магмы, заново разбивая тоненькую твердую оболочку. Добавляли жару и радиоактивные элементы, в изобилии имевшиеся на Земле: от короткоживущих тепловыделяющих изотопов алюминия и вольфрама до долгожителей — радиоактивных изотопов урана, тория и калия. Да и недавно возникшая развивающаяся атмосфера, разогреваемая парами от вулканических выбросов, богатых углекислым газом и водой, усиливала общий нагрев, производя сверхпарниковый эффект.

Неизвестно, сколько это продолжалось, — сотни, а может, сотни тысяч лет — геологический миг, пока Земля пребывала в расплавленном состоянии. Но ей суждено было постепенно остыть и затвердеть. Согласно второму началу термодинамики раскаленные тела, не имеющие источника внешней энергии, обязательно охлаждаются: чем горячее объект, тем выше скорость остывания.

Этот температурный переход осуществляется за счет трех известных механизмов. Во-первых, это теплопроводность. Когда более горячий объект соприкасается с более холодным, тепловая энергия перетекает от горячего к холодному. Этот процесс вы можете легко представить, если когда-либо обжигали ноги о нагретую солнцем мостовую или касались рукой раскаленного обогревателя: он происходит в результате постоянного колебания атомов. Когда холодный объект с медленно колеблющимися атомами соприкасается с «буйными» атомами горячего объекта, некоторые быстрые атомы передают свои колебания медленным. Если вы коснетесь достаточно горячего объекта, такие столкновения атомов могут повредить клетки кожи, вызывая ожоги. Механизм теплопроводности удобен для локальной передачи тепла при соприкосновении объектов,

но не слишком эффективен в планетарном масштабе. При этом требуется очень много времени для передачи колебаний между атомами.

Более удобным для планетарных процессов передачи тепловой энергии является конвекция, когда тепло передается в большом объеме. Налейте в кастрюлю воды, включите плиту и понаблюдайте. Вначале процесс развивается медленно: нагреваясь, кастрюля передает тепло холодной воде за счет теплопроводности, когда активные атомы металлов постепенно раскачивают атомы воды. Но вскоре включается другой механизм. Нагретая внизу вода начинает подниматься сквозь прохладные слои и массово несет тепло на поверхность. Одновременно прохладные слои сверху опускаются на горячее дно. Нагревание идет все быстрее и быстрее, столбики воды поднимаются и опускаются вплоть до начала кипения. В результате конвекционных потоков поднимающейся горячей и опускающейся холодной воды в большом объеме быстро распространяется тепло с помощью такого стремительного и эффективного танца.

В масштабах всей Земли процесс конвекции продолжается непрерывно — в прохладных бризах жарким летним днем, в обширных океанских течениях от экватора до Арктики, в бурных грозовых фронтах, в горячих источниках и гейзерах. То же самое происходит внутри Земли, где горячие спрессованные породы размягчаются и поднимаются наверх, словно расплавленная карамель, в продолжение миллионов лет. Более прохладные и плотные породы с поверхности погружаются вниз, в то время как более горячие и менее плотные поднимаются, вытесняя их. На протяжении всей земной истории конвекция служит главным механизмом охлаждения планеты.

И наконец, тепловое излучение — третий механизм передачи тепла. Всякий горячий объект распространяет тепло на более прохладное окружение в форме инфракрасного излучения, которое в вакууме проходит 300 000 км за одну секунду. Это всем знакомый вид энергии, особенно когда вы расслабитесь и нежитесь под лучами солнца, похожий на волны видимого

света (однако тепловое излучение отличается более длинными волнами). Самым очевидным источником энергии инфракрасного излучения является Солнце, омывающее Землю инфракрасными лучами, которые достигают ее за 8,3 минуты. Электрообогреватель, уютный огонь в камине или старые добрые батареи водяного отопления — всем нам хорошо знакомые источники инфракрасного излучения. Каждый нагретый объект излучает тепло в более холодную окружающую среду. Наше тело не является исключением. Переполненная аудитория быстро нагревается до неприятной температуры — каждый человек излучает тепло подобно стоваттной электролампе. Это легко проверить, надев очки ночного видения, через которые видно, как люди и животные, излучающие инфракрасную энергию, ярко светятся в темноте.

Интенсивность теплопередачи, в результате теплопроводности, конвекции или излучения, зависит от разницы температур между горячим и холодным объектом. Теплопроводность работает быстрее, конвекция энергичнее, а теплоизлучение гораздо мощнее, если разница между температурами достаточно велика. Земля — планета теплая. Обращаясь вокруг Солнца в холодном пространстве, она постоянно излучает тепловую энергию в космическую пустоту. Но раскаленная Земля после столкновения с Тейей выбрасывала тепловую энергию в космос в невиданных для нашего времени объемах. Поистине, она пылала в черной пустоте космического пространства.

Первая твердь

По причине громадного выброса тепловой энергии в космос, формирование твердой земной коры было неизбежно. Скорее всего, поблизости от одного из полюсов Земли, наименее затрагиваемого приливными силами, расплавленная поверхность охладилась настолько, что смогли образоваться первые кристаллы. Но эти процессы протекали отнюдь не просто. Большинство обычных веществ имеет четко определенную температуру перехода из жидкого состояния в твердое — так назы-

ваемую точку замерзания. Жидкая вода замерзает при 0 °C, серебристый металл ртуть — при –38 °C, а этанол (обычный питьевой спирт) — при –117 °C. С магмой все обстоит иначе. Любопытная особенность магмы состоит в том, что у нее нет определенной точки замерзания (вообще понятие точки замерзания для магмы, раскаленной свыше 1300 °C, можно считать чем-то вроде оксюморона).

Начнем непосредственно с пекла сразу же вслед за великим столкновением 4,5 млрд лет назад, когда Земля и Луна были окружены силикатным паром при температурах, превышающих 5000 °C. Это адское пекло быстро охлаждалось, газ конденсировался в капли и проливался магматическим дождем на новорожденных космических близнецов, чья температура неуклонно снижалась до 3000 °C, затем до 2000 °C и до 1500 °C. Именно тогда начали формироваться первые кристаллы.

Такие представления о появлении первых горных пород на Земле царят в среде петрологов-экспериментаторов, изобретающих все новые лабораторные опыты, нагревая и сжимая горные породы, дабы воспроизвести условия земных глубин. Попытки раскрыть тайну происхождения горных пород сталкиваются с двумя техническими сложностями. Во-первых, необходимо работать с невероятно высокими температурами, в тысячи градусов, до которых не разогревается ни одна бытовая печь. Для достижения таких температур ученые разработали катушки из тщательно уложенной платиновой проволоки, через которые пропускается сильный ток. Еще более сложным техническим условием является необходимость поддерживать такие температуры одновременно с давлением, превышающим десятки, а то и сотни тысяч атмосфер. Для выполнения таких задач исследователи применяют массивные гидравлические прессы и мощные насосы.

Вот уже более века центром таких героических подвигов во славу земных глубин служит моя родная Геофизическая лаборатория Института Карнеги. Некоторое, увы, короткое время я работал вместе с Х. С. Йодером-младшим (вплоть до его безвременной кончины), одним из инициаторов экспериментальной

петрологии и крупнейшим в мире специалистом по происхождению базальтов. Внимательный к людям, Йодер был человеком увлеченным, импозантным и энергичным — в буквальном смысле слова выдающимся. Во время Второй мировой войны он служил в ВМС США и близко познакомился с гигантскими металлическими механизмами. В 1950-е годы Йодер пришел на работу в Геофизическую лабораторию Института Карнеги, где использовал отработанные детали боевых орудий с линкоров, орудийные дула и бронированную обшивку, сохранившие серую окраску, для создания лаборатории высокого давления, которая определила судьбу Йодера на полвека, а также позволила нам кое-что узнать о земле, по которой мы ходим.

Центром установки, созданной Йодером, была «бомба» — массивный стальной цилиндр 30 см в диаметре и 50 см в длину, с внутренним диаметром примерно 2,5 см. Один конец бомбы соединялся с рядом насосов, компрессоров и усилителей давления, способных выработать до 12 тыс. атмосфер. Именно такое давление существует на глубине 40 км от поверхности Земли — эквивалент энергии от взрыва динамитной шашки (если бы устройство, не дай бог, взорвалось). На другом конце бомбы находился 30-сантиметровый контейнер для образцов и огромная шестигранная гайка. Мы герметично закупоривали этот контейнер, закручивая гайку гаечным ключом метровой длины и 9 кг весом.

Вся прелесть этого устройства состояла в том, что мы помещали каменный порошок и образцы минералов в маленькие золотые трубки, загружали эти трубки в нагреваемый цилиндрический контейнер и помещали все это в барокамеру-бомбу. Дальше надо было только обеспечить нужное давление, включить электронагреватель, а «бомба» проделывала все остальное. На каждый цикл уходило до шести золотых трубок; длился такой цикл от нескольких минут до нескольких дней. Замечательное изобретение Йодера идеально подходило для исследования условий возникновения горных пород в коре и мантии Земли.

Йодер со своими коллегами выяснил, что расплавленный металл, включавший большую шестерку элементов, обычно

начинает твердеть, образуя кристаллы силиката магния — оливина, при охлаждении до 1500 °С. Как на Луне, так и на Земле в те далекие времена, когда шел процесс охлаждения, в раскаленной магме начинали вырастать красивые зеленые кристаллики, словно крошечные семена, которые постепенно увеличивались до размера дробинок, потом горошин, потом виноградин. Но оливин, как правило, плотнее жидкой среды, в которой он вырастает, и потому первые кристаллы начинали тонуть, причем чем больше они вырастали, тем быстрее тонули, скапливаясь в плотную массу кристаллов и образуя потрясающей красоты зеленого цвета породу — дунит. Этот камень представляет исключительную редкость на Земле, появляясь на поверхности в основном во время горообразовательных процессов или эрозии, когда обнажаются глубинные скопления оливина.

Процесс погружения кристаллов оливина медленно изменял остывающую магму в глубинах Земли и Луны. Оставшиеся расплавленные металлы меняли структуру; постепенно теряя магний, они становились более насыщенными кальцием и алюминием. На Луне по мере остывания магматического океана начал формироваться второй минерал. Анортит, или полевой шпат, состоящий из алюмосиликата кальция, кристаллизировался наряду с оливином, образуя светлые скопления. В отличие от оливина, анортит легче окружающей его жидкой среды и потому оставался на плаву. На Луне анортит в огромных количествах всплывал на поверхности магмы и образовывал обширный верхний слой: целые плавучие горы полевого шпата простирались грядой в несколько километров над расплавленной поверхностью. Эти белесовато-серые массы до сих пор покрывают около 65% поверхности Луны и называются Лунным нагорьем. Поднявшись первыми над поверхностью океана магмы, они являются древнейшими горными образованиями на Луне. Судя по образцам лунного грунта, доставленным «Аполлонами», возраст анортитов составляет от 3,9 млрд лет (самые молодые) до 4,5 млрд (самые древние), т. е. они образовались вскоре после Великого столкновения.

На Земле, где влаги было больше и океаны магмы глубже, а соответственно внутренние температуры и давление были гораздо выше, события развивались по-другому. Небольшое количество анортита образовалось в ранний период остывания Земли, в основном ближе к поверхности, где давление было ниже, но этот минерал сравнительно редок. Зато в больших масштабах формировался богатый магнием пироксен, самый распространенный из числа силикатов, который, смешиваясь с оливином, образовал толстый слой кристаллической шуги. Древнейшие породы на Земле включали оливин и пироксен в виде твердой зеленовато-черной породы под названием перидотит. Разновидности перидотита начали формироваться на глубине примерно 80 км от поверхности Земли, возможно, более 4,5 млрд лет назад, и процесс этот продолжался многие сотни миллионов лет.

Несмотря на относительное обилие в начале процесса охлаждения, перидотит в настоящее время редко встречается на поверхности Земли. Согласно одной модели, массы перидотита затвердели и остыли, образовав кратковременную твердую поверхность Земли. Но остывающий перидотит, подобно своему предшественнику, дуниту, был значительно плотнее магмы, в которой он формировался. В результате слой твердого перидотита раскалывался и погружался в мантию, вытесняя на поверхность магму, которая, в свою очередь, остывая, образовывала новые массы перидотита. На протяжении сотен миллионов лет земная мантия постепенно твердела, превращаясь в своего рода конвейерную ленту, простирающуюся на 80 км из глубины до поверхности Земли. Соотношение между плотным перидотитом и магмой изменялось в сторону увеличения перидотита, пока почти весь верхний слов мантии не превратился в твердую оливин-пироксеновую породу.

Правда о ядре

Под земной корой, на глубине 80–320 км охлаждение и кристаллизация магмы в мантии происходят в похожем режиме,

разве что помедленнее. Подробности этого процесса остаются неясными — необходимы более совершенное оборудование высокого давления и высоких температур для установления истины. По всей видимости, отделение кристаллов от расплавленной массы в процессе погружения и всплытия играет такую же значимую роль, что и в верхних слоях магмы.

Почти все, что нам известно об этих скрытых, глубинных процессах, мы получаем из наблюдений сейсмологов, которые изучают распространение звуковых волн в земных недрах. Земля постоянно гудит, как колокол: сокрушительные приливы, громыхающий транспорт и землетрясения, большие и малые, — все это сотрясает Землю и распространяет сейсмические волны. Подобно звуковым волнам в узком ущелье с крутыми склонами, сейсмические волны порождают эхо, отражаясь от поверхности. Изучение сейсмических волн показывает, что внутренность Земли представляет собой сложную и многослойную структуру.

В самом общем виде в строении Земли можно выделить три слоя: тонкая, с низкой плотностью кора на поверхности, более толстая и плотная мантия посредине и плотное металлическое ядро в центре. Каждая из этих структур, в свою очередь, состоит из нескольких слоев. Мантия, например, делится на три слоя: верхняя мантия, переходная зона и нижняя мантия. Верхний слой, состоящий преимущественно из перидотита, простирается на глубину примерно 660 км. В этих глубинах давление заставляет атомы оливина сблизиться, что приводит к образованию более плотной разновидности кристаллов силиката — вадслеита, минерала, преобладающего в переходной зоне мантии. Для нижней мантии, занимающей следующие 2900 км, характерны еще более плотные разновидности силикатов магния. Давление в нижней мантии настолько велико — в сотни тысяч раз больше атмосферного, что кремниево-кислородные соединения переходят в еще более плотную форму, с более оптимальной упаковкой атомов, под общим названием перовскит.

Сейсмические наблюдения регистрируют природу и протяженность каждого из этих различающихся минералогиче-

ским составом слоев мантии, и в целом оказывается, что переходы между ними носят достаточно выраженный характер. Точная глубина залегания переходных границ между слоями мантии в разных местах слегка варьирует, где-то в пределах 16–32 км. Например, под континентами глубина границ одна, под океанами — другая, но всюду эти границы пологие и «правильные». В отличие от «идиллии» с внутримантийными границами, сейсмические данные о границе между мантией и ядром свидетельствуют о чрезвычайно сложной структуре. На первый взгляд, эта граница порождает, как и должно быть, сильное эхо. В самом деле, разница плотностей силикатной мантии и металлического ядра настолько велика, что создает физическую границу такую же резкую, как граница между водой и воздухом, что вызывает мощнейший сейсмический сигнал из глубин Земли. Эту границу — как одну из первых скрытых в глубине Земли тайн — сейсмологи зафиксировали более 100 лет назад.

Идеально гладкая и ровная граница должна была бы дать явный, сфокусированный сейсмический сигнал — эхо, которое сейсмограф зафиксировал бы в виде отчетливого пика. Однако сейсмические сигналы, отражающие границу между мантией и ядром, чаще всего носят смазанный, беспорядочный и прерывистый характер. Выглядит так, будто там, в глубине, встречаются неровные глыбы или кучи обломков. Геофизики, известные своим пристрастием к невыразительной терминологии, назвали эту бугристую и хаотичную зону слоем D^2, т. е. D-два-штриха. (Астрофизики придумывают куда более образные термины, например, *коричневый карлик, красный гигант, темная энергия или черная дыра*; они более изобретательны в игре названий.)

Сложность этого слоя D^2 отчасти объясняется значительной разницей в плотности между однородным железом металлического ядра и многообразием состава насыщенных кислородом минералов мантии. Минералы мантии плавают на поверхности плотного ядра, как пробка на поверхности воды, но сами эти минералы сильно различаются между собой по удельному

весу. В первичном океане магмы некоторые силикаты тонули, другие всплывали. В результате большие куски кристаллизованного твердого вещества погружались к основанию мантии и подобно плотам плавали на поверхности металлического ядра. Некоторые сейсмологи говорят о возможных «горах» в несколько сотен километров высотой и нагромождениях плотных минералов, скопившихся на границе между мантией и ядром: именно они хаотически преломляют сейсмические сигналы.

По-видимому, на границе ядра и мантии возможны также бассейны и лужи необычайно плотной силикатной жидкости, богатой алюминием и кальцием, а также массой «несовместимых элементов», которые вообще отсутствуют во внешних слоях Земли. Проверить это чрезвычайно трудно, но сейсмологи указывают на существование в слое D^2 локальных «зон низких скоростей», непосредственно над границей между мантией и ядром, где сейсмические волны распространяются со скоростью примерно на 10% ниже, чем в области соседних плотнотельных сред. Замедление сейсмических волн — это вернейший признак жидкой среды. Эти жидкие образования и пруды жидкости подсказывают также решение частной проблемы недостающих элементов: просто нужно искать все несовместимые элементы в недосягаемом слое D^2, где они навечно спрятаны в этой загадочной, разнородной по составу зоне минералогического старья.

Что же представляет собой само ядро? В пору ранней юности у Земли было плотное, богатое железом ядро диаметром более 3000 км, правда, еще расплавленное (в отличие от того ядра, которое мы знаем сегодня — в виде постоянно растущего шара из твердых кристаллов железа диаметром примерно 1200 км). Температура на границе между ядром и мантией могла тогда превышать 5000 °C, при давлении миллион атмосфер.

Раскаленное ядро с самого начала (и по сей день) является довольно подвижным образованием — в нем движутся завихряющиеся потоки жидкого металла. Одним из важных последствий движения этих потоков является формирование

первичного магнитного поля Земли — магнитосферы, похожей на гигантский электромагнит. Магнитные поля отклоняют электрически заряженные частицы, так что магнитосфера Земли служит невидимым щитом-отражателем, защищающим Землю от интенсивного бомбардирования солнечным ветром и космическими лучами. Возможно, этот барьер был необходимым условием для зарождения и сохранения жизни.

Ядро является также важным источником тепловой энергии, помогая поддерживать конвекцию в мантии. По сей день мантийные потоки из пластичных горных пород поднимаются из глубины более 3000 км, с границы между мантией и ядром, в вулканических горячих зонах, таких как Гавайи или в Йеллоустоун. Примечательно, что выявленные места выбросов магмы на поверхность могут предопределяться глубинной топографией. Упомянутые многокилометровые горы слоя D^2 могут выполнять роль своеобразных теплоизоляторов, лежащих на горячем ядре. Вполне вероятно, что в самых глубоких долинах, разделяющих эти величественные скрытые горы, теплопоток выше, что приводит к образованию известных нам вулканических горячих зон.

Базальт

По существу, эволюция минералов основывается на предопределенной последовательности формирования горных пород, где каждая последующая стадия логически вытекает из предыдущей. Образование первой перидотитовой земной коры, порожденной первичной магмой, было критически важной, но промежуточной фазой развития Земли. Окончательно охлажденная и затвердевшая, она оказалась слишком плотной и не могла сохраниться на поверхности магмы, а потому снова погрузилась в недра Земли. Для того чтобы опоясать планету, требовалась менее плотная порода. Такой породой оказался базальт.

Во всех планетах земного типа черный базальт преобладает среди близких к поверхности пород. Изрезанный шрамами

от атак астероидов, верхний слой Меркурия состоит преимущественно из базальта. То же самое можно сказать о выжженной, гористой коре Венеры и выветрелой* красной поверхности Марса. Темные пятна на Луне («моря») контрастируют с бледно-серыми анортозитовыми нагорьями и являются не чем иным, как остатками огромных озер черного базальта; 70% поверхности Земли, включая дно всех океанов, подстилается базальтовой корой.

Базальты состоят из разных минералов, среди которых явно выделяются два силикатных минерала. Один из таких важнейших минералов — полевой шпат плагиоклаз, между прочим, самый главный алюмосодержащий минерал на планетах земного типа и их спутниках и самый распространенный минерал в земной коре. Преподаватель MIT, профессор Дейв Воунз однажды посоветовал, если мне покажут какой-нибудь загадочный камень с целью определить, из каких минералов он состоит, смело отвечать «из плагиоклаза» — и я окажусь прав в 90% случаев. Второй важнейший минерал в составе базальта — это пироксен, обычный силикат, входящий также и в перидотит. Пироксен входит в число самых простых минералов, которые способны вмещать всю «большую шестерку» (а также множество более редких элементов).

Чтобы понять происхождение плагиоклаза и пироксена, двух основных минералов в составе базальта, вспомните странные свойства, которыми сопровождается остывание и плавление горных пород. Четыре с половиной миллиарда лет назад, когда остывал океан магмы на Земле, первым образовался оливин, потом анортит и, наконец, в большом количестве — пироксен. В результате получился перидотит, силикат магния, который и составил большую часть верхнего слоя мантии. Большие массы перидотита погружались в магму, где снова нагревались и частично плавились.

Наше знакомство с процессом плавления подсказывает, что переход из твердого состояния в жидкое происходит

---

* Изменившейся в процессе выветривания. — *Прим. ред.*

при определенных температурах. Лед плавится (тает) при 0 °C, свечной воск — около 60 °C, а тяжелый свинец — при 327 °C. Однако с горными породами дело обстоит не так просто: большинство пород не имеет постоянной температуры плавления. Если нагреть перидотит свыше 1000 °C, он начнет плавиться (плавление может начаться и раньше, если в перидотите содержится много воды и углекислого газа). Состав первых микроскопических капель существенно отличается от основной массы породы. В начале плавления капли содержат гораздо больше кальция и алюминия, немного больше железа и кремния и гораздо меньше магния, чем основная порода. Первоначальные капли также отличаются гораздо меньшей плотностью. Поэтому даже 5% расплавленного перидотита порождают в мантии большое количество магмы, которая накапливается вдоль границ минеральных блоков, заполняет трещины и карманы и поднимается к поверхности, чтобы впоследствии превратиться в базальт. За миллиарды лет существования Земли частичное плавление перидотита породило сотни миллионов кубических километров базальтовой магмы.

Расплавленный базальт поднимается к поверхности планеты двумя дополняющими друг друга путями. Один — это величественное зрелище извержения вулканов, как на Гавайях или в Исландии, когда над горой вздымаются огненные фонтаны и реки магмы стекают вниз потоками лавы. Такие драматические извержения происходят из-за содержания в породе воды и других летучих веществ, которые остаются жидкими в силикатной среде при высоких давлениях на большой глубине, но резко переходят в газообразное состояние, приближаясь к поверхности. При таких взрывах пепел и токсичные газы поднимаются вверх, достигая стратосферы, а вулканические бомбы размером с автомобиль разлетаются на километры, уничтожая все вокруг.

Слой за слоем, базальтовые лавы и пепел образуют черные горы, высотой на многие тысячи метров, покрывая тысячи квадратных километров. Такой тип потоков базальтовой лавы и вулканического пепла отличается чрезвычайно мелкозерни-

стой структурой и обилием стекла вследствие того, что охлаждение жидкой породы происходит так быстро, что не успевают сформироваться кристаллы. В результате получается ровная, черная кора застывшей лавы. Другие характерные оливиновые базальты, возникающие, если только перидотит плавится лишь частично, на сравнительно небольших глубинах порядка 30 км, содержат небольшое количество блестящих кристаллов оливина, которые образуются еще на глубине, на первой стадии отвердения. Эти зеленые кристаллы украшают невыразительную черную породу.

Нужна огромная энергия для того, чтобы магма могла пробиться к поверхности, поэтому значительная часть базальтовой магмы никогда не поднимается на поверхность. Эти раскаленные докрасна жидкие массы застревают глубоко под поверхностью Земли, где они остывают медленнее, образуя столбчатые кристаллы полевого шпата и пироксена в составе диабаза или габбро. Иногда магма внедряется в узкие, субвертикальные трещины в массивах горных пород, образуя доскообразные заполнения с гладкой поверхностью (дайки). Если вмещающая дайку горная порода мягкая, то в результате миллионов лет эрозии может появиться длинная, прямая диабазовая стена, которая выглядит зловеще, как разрушенный археологический объект. Напротив, если магма внедряется между слоями осадочных пород, залегающими горизонтально, образуются тела, напоминающие толстое одеяло (силлы). Обрывистые скалы Палисады, которые можно наблюдать вдоль западного берега реки Гудзон чуть выше Нью-Йорка, являются как раз одной из таких базальтовых силл, которые плавно погружаются к западу, образуя параллельные возвышенности в северном Нью-Джерси и южной части штата Нью-Йорк (тут же расположены места самой дорогой недвижимости). В некоторых случаях магма охлаждается в магматических камерах неправильной формы, которые могут уходить глубоко вниз и тянуться на многие километры. Однако независимо от того, в какой геометрической форме в конце концов окажется застывшая

магма, на самом деле диабаз и габбро ничем не отличаются от базальта.

Неизбежное образование базальтовой коры впервые осчастливило Землю устойчивой, твердой поверхностью, способной плавать поверх магмы. До образования коры, когда поверхность планеты формировалась только магмой и перидотитом, ничто не могло возвышаться над земной поверхностью сколько-нибудь заметно и достаточно долго. Раскаленная докрасна перидотитовая каша не годилась для поддержки гор. Совсем другое дело — прочный базальт относительно малой плотности. Средний удельный вес базальта примерно на 10% ниже, чем у перидотита. Благодаря этому плавающий в магме массив базальта мощностью 16 км мог выступать из океана магмы более чем на 1,6 км. Быстро нарастающие вулканические конусы могли подниматься еще выше, вероятно, выше 3 км над средним уровнем поверхности. Итак, исполненная хаоса поверхность Земли начала приобретать более-менее отчетливые очертания.

Враждебный мир

Если смотреть из космоса — например, с безопасного расстояния молодой Луны, базальтовая оболочка Земли выглядела бесконечно черной с красными дуговидными трещинами и отдельными яркими пятнами, где гигантские, фонтанирующие лавой вулканы вздымались над поверхностью. Облака грязновато-белого, смешанного с золой пара окутывали некоторые из наиболее богатых летучими веществами вулканы и окружающую территорию.

Вообразите себя на только что образовавшейся, черной земной коре гадейской эпохи, более 4,4 млрд лет назад. Вы не смогли бы долго просуществовать в суровом, чужеродном мире. Метеориты неустанно обрушиваются на поверхность планеты, разбивая тонкую, хрупкую кору, разбрасывая вокруг камни и расплескивая магму. Повсюду вздымаются конусы вулканов, поднимаясь на тысячи метров ввысь и выбрасывая

громадные фонтаны магмы под воздействием взрывов пара и летучих веществ, которые в один прекрасный день охладятся настолько, что превратятся в океаны и атмосферу. И ни следа жизненно необходимого кислорода. Над суровой, совсем еще юной Землей витает невыносимый запах сернистых соединений, вашу кожу ошпаривает раскаленный пар, ваши глаза выжигает ядовитый газ. В этом враждебном мире вас ждала бы короткая, но мучительная агония.

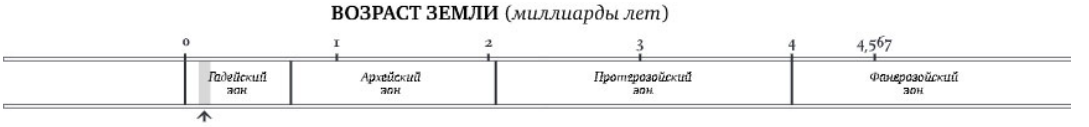
Удалявшаяся Луна все еще играла важную роль в образовании земной коры. Охватывавшие весь земной шар приливы раскаленных камней и магмы, хотя и не с той мощью, что в первые века после катастрофы с Тейей, постоянно раскалывали и коробили земную поверхность, образуя трещины, сквозь которые красная жижа вновь и вновь выплескивалась наружу, препятствуя образованию твердой поверхности. Неприятное соседство с Луной вызывало бешеное вращение Земли вокруг собственной оси: сутки по-прежнему продолжались пять часов, бушевали неистовые бури и немыслимой силы ураганы, куда более жестокие, чем все те, что нам показывают сегодня в метеосводках.

Но под этой неприглядной поверхностью уже начались неотвратимые процессы превращения Земли в живую планету. В ее перемешанных, расплавленных глубинах начали формироваться определенные структуры — вещество, из которой впоследствии образуются континенты и океанское дно, атмосфера и моря, растения и животные. Нагрев, охлаждение и кристаллизация с последующим разделением кристаллов, часть из которых оседала, а часть всплывала, накапливание перидотита, частичное плавление — все это формировало Землю в те далекие времена юности планеты, 4,5 млрд лет назад. Эти процессы продолжаются даже и по сей день.

Необъятное хранилище внутренней тепловой энергии Земли, о котором мы в основном и рассуждаем в этой главе, продолжает играть важнейшую роль в формировании нашей родной планеты. В наши дни самым очевидным проявлением мощи раскаленных недр являются действующие вулканы с их фонтанами

раскаленной магмы и огненными реками лавы. Об адском пекле, скрытом глубоко в недрах планеты, напоминают гейзеры и горячие сернистые источники. Вот уже более 4,5 млрд лет земной истории поверхность планеты держит удар тепловой энергии, рвущейся из раскаленной сердцевины к растрескавшейся поверхности и далее в космическое пространство. Под напором конвективных завихрений мантии и непрерывным давлением приливных сил Луны поверхность Земли изгибается и коробится, раскалывается и скручивается. Континенты находятся в постоянном движении, расходятся, сталкиваются, трутся друг о друга в бесконечном танце тектонических плит под управлением тепловой энергии. В течение всей нашей жизни внутреннее тепло Земли изменяет твердь, по которой мы ходим, перерабатывает воду, которую мы пьем, и изменяет воздух, которым мы дышим.

Из-за внутреннего жара Земля какое-то время оставалась черной планетой, глазированной тонкой базальтовой коркой. Но детство планеты не могло длиться долго. Новый ярко-голубой слой вот-вот должен был окутать земной шар в результате вулканической активности.



Глава 4

Голубая Земля

Образование океанов

Возраст Земли: от 100 до 200 млн лет

Раннее детство Земли, первые полмиллиарда лет или около того, окутаны мраком тайны. Горные породы и минералы предоставляют нам осязаемые данные о большей части исторического прошлого планеты, но мало что из горных пород и минералов сохранилось от самого древнего из периодов — гадейской эпохи. По этой причине любое описание процесса первичного охлаждения Земли и появление на ее черной поверхности воды опираются на предположения, основанные на экспериментах, моделях и расчетах. При этом неизбежны различного рода неточности.

Впрочем, это тоже полезно. Ведь ничто не приносит такое разнообразие и оживление в работу лаборатории, как осознание того, что «мы знаем, что мы ничего не знаем», и вероятность того, что в любой день мы можем обнаружить какой-нибудь мелкий факт, который приблизит нас к истине. Еще более соблазнительной представляется возможность обнаружить в природе вещей нечто такое, о чем «мы не знали, что мы не знали», т. е. сделать такие открытия, которые рас-

ширят пределы таинственного*. Именно способность ставить вопросы по-новому торит дорогу к прорывным открытиям: например, вместо того, чтобы просто спросить «Каковы химические и физические свойства минералов?», можно задаться вопросом «Как эволюционировали минералы?».

Очень важно составить список того, что мы не знаем. Все данные свидетельствуют о том, что Луна образовалась в результате сильнейшего столкновения, однако мы не можем с уверенностью сказать, ни когда именно это столкновение произошло, ни какова была заключительная траектория Тейи. Учитывая колоссальную мощь этого удара, можно представить, что на магматический океан Земли обрушился проливной дождь раскаленных силикатов, но у нас столь мало данных о длительности и интенсивности остывания перегретой планеты, что это может на десятилетия остаться предметом научной полемики. Столь же неточными представляются данные о первичном расстоянии и скорости удаления Луны, хотя они являются решающими для понимания ее эволюции. Точно так же мало известно, когда впервые образовались океаны и как они выглядели. Как бы то ни было, они образовались, и наш последующий рассказ, основанный на всех новейших данных, имеет полное право на существование.

Черная Земля не могла долго оставаться черной. По всей планете вулканы ежедневно миллиардами тонн выбрасывали в густеющую атмосферу азот, углекислый газ, ядовитые сернистые соединения и водяной пар. Эти летучие вещества и соединения — те же молекулы, которые образовали различные виды льдов в первичном газово-пылевом облаке, те же атомы, которые мы вдыхаем и которые входят в состав сложнейших тканей нашего организма, — выполняли множество функций в процессе быстрой эволюции Земли. Горячая вода, смешиваясь с горными породами магмы, снижала их температуру плавления, превращая их в чрезвычайно перегретый суп, устремляв-

* Эти цитаты часто приписываются докладам Дональда Рамсфельда (2002 г.), однако впервые они появились в 1997 г., в предисловии Максин Сингер к моей книге «Почему черные дыры не черные?» (Why Aren't Black Holes Black?). — *Прим. авт.*

шийся к поверхности. Вблизи поверхности газы, растворенные в этом магматическом супе, превращались из жидкости в бурно расширяющийся газ, вызывая массированные извержения вулканов, нечто вроде газированной воды, вырывающейся из-под крышки бутылки после хорошего взбалтывания. В насыщенных водой флюидах (жидких и газообразных легкоподвижных компонентах магмы) растворялись также и концентрировались редкие элементы: бериллий, цирконий, серебро, хлор, бор, уран, литий, золото и многие другие — все это впоследствии превратится в разнообразные рудные тела в становящейся более сложной земной коре. В хаосе земной поверхности бурлящие потоки и сокрушительные волны выполняли главную роль в эрозии горных пород, образовании первых песчаных отмелей и накоплении прибрежных осадочных отложений. Коротко говоря, вода явилась главным архитектором твердой поверхности Земли.

Внимание к океанам и атмосфере носит несколько антропоцентричный характер, поскольку эти подвижные среды занимают незначительное место на планете в целом. В наше время океаны составляют всего 0,02% всей массы Земли, а атмосфера занимает примерно одну миллионную часть от ее массы. Тем не менее Мировой океан и атмосфера оказали и продолжают оказывать невероятно большое влияние на превращение Земли в уникальную планету, каковой она является сегодня.

Пять основных игроков — азот, углерод, сера, водород и кислород — исполняют ведущие роли среди подвижных газовых составляющих Земли. Все эти ингредиенты в изобилии производятся крупными звездами, широко распространяются при взрыве сверхновых звезд, и все они сконцентрировались в самых примитивных, богатых углеродом хондритах более 4,5 млрд лет назад.

В целом средний химический состав метеоритов хондритов совпадает с таковым составом Земли. Элементы большой шестерки (кислород, кремний, алюминий, магний, кальций и железо), описанной в главе 3, встречаются в похожей пропорции, так же как и разнообразные, менее распространенные эле-

менты. Но даже самое беглое знакомство с этими удивительными обломками древности показывает, что в наше время на планете отсутствует большая часть летучих веществ, которые были раньше. Самые примитивные хондриты содержат более 3% углерода, но все известные источники углерода на Земле содержат не более 0,1%. Похожим образом и содержание воды в хондритах превышает среднее содержание воды в породах современной Земли примерно в 100 раз и больше. Такие существенные различия в составе указывают на бурное и беспорядочное прошлое. Большинство неустойчивых веществ либо улетучилось с Земли в космос, либо погребено так глубоко, что до них не добраться.

Ключ к пониманию превращения Земли из враждебной негостеприимной черной планеты в прохладный, обитаемый голубой мир следует искать в истории ее непоседливых летучих соединений. Но со времен первого полумиллиарда лет планеты в первозданном виде не сохранилось ни одного из летучих соединений. Почти весь азот и углерод, сера и вода претерпели бесчисленное количество изменений, хотя те же самые атомы использовались вновь и вновь. Хондриты метеоритов дают нам основу для предположений; несколько образцов минералов и горных пород времен первого миллиарда лет земной истории вкупе с данными, полученными с Луны и других объектов Солнечной системы, позволяют уточнить наши рассуждения. Так же как при изучении эволюции мантии и коры в первые 100 млн лет и процесса формирования звезд задолго до этого, ключ к сколько-нибудь достоверному сценарию следует искать в знании неизменных характеристик исследуемых элементов, в нашем случае в физических и химических свойствах летучих — азота, углерода, серы и воды.

Из этих четырех веществ легче всего разобраться с азотом. Это химически инертный газ, который образует малое число минералов, почти не участвует в образовании горных пород и в основном сосредоточен в атмосфере. Только с появлением жизни на Земле увеличилось значение азотного цикла в формировании верхних слоев планеты. Углерод и сера также

выдвинулись на заметные роли примерно 1–2 млрд лет назад, когда жизнь и насыщенная кислородом атмосфера преобразовали земные реалии. Но четвертый компонент, вода, с самого начала стал определяющим для истории Земли.

Вода: краткая биография

Многообразные геологические функции воды вытекают из химических свойств окиси водорода. Не забудем, что водород — это элемент номер один, а кислород — элемент номер восемь; ни один из них не содержит магического числа двух или десяти электронов. Каждый принимающий электроны атом кислорода нуждается в двух дополнительных электронах, чтобы достичь магического числа десять, а каждому атому водорода с единственным электроном нужен еще один электрон. В результате образуется молекула с пропорцией водорода к кислороду два к одному: H_2O. В этом соединении атомы принимают компактную V-образную форму: к центральному, более крупному атому кислорода с двух сторон присоединяются два атома водорода, нечто похожее на уши Микки-Мауса. Позаимствовав два электрона у двух атомов водорода, атом кислорода получает слабый отрицательный электрический заряд, а каждый из двух атомов водорода соответственно приобретает слабый положительный заряд. В результате возникает полярная молекула, в которой друг другу противостоят положительно и отрицательно заряженные частицы (примерно как уши и подбородок у Микки-Мауса).

Многие особенности молекулы воды объясняются такой полярностью. Полярная вода является суперрастворителем, поскольку сильное воздействие ее положительных и отрицательных зарядов способно разрушать другие молекулы. Поэтому в воде так быстро растворяется поваренная соль, сахар и многие другие вещества. Чтобы растворить горные породы, времени требуется больше, но за миллионы лет в океанах скопились почти все химические элементы. (В результате в каждом кубическом километре морской воды содержится около

44 кг золота, ценностью более 2,4 млн долларов, по текущему курсу драгоценных металлов, если бы существовали технологии, позволяющие добыть это золото из воды.) Такая несравненная способность воды растворять и перемещать различные химикаты превращает ее в идеальную среду для зарождения и развития жизни. Жизнь на Земле и, пожалуй, повсюду в космосе зависит от воды.

Полярность молекул воды обусловливает их прочную связь друг с другом: положительно заряженная сторона молекулы притягивает отрицательно заряженные края других молекул. Вот почему лед является таким твердым (в чем можно убедиться, если вам приходилось когда-либо падать, катаясь на коньках). Чрезвычайно крепкая межмолекулярная связь воды сказывается и в высоком поверхностном натяжении — удивительное свойство, которое позволяет мелким насекомым буквально ходить по воде. В свою очередь, поверхностное натяжение ведет к капиллярности, которая позволяет воде подниматься по узким каналам ствола растения и питать влагой деревья высотой десятки метров. Появление круглых капель дождя под влиянием сильного взаимного притяжения молекул воды — еще одно проявление поверхностного натяжения и важное условие необычайно быстрого круговорота воды на планете. Неполярные, летучие молекулы вроде метана или углекислого газа не способны образовывать круглые капли. Они просто парят в атмосфере в виде сверхтонкого, всепроникающего тумана, так что на планетах, где в атмосфере преобладают такие газы, слово «дождь» не известно.

Крепкая взаимосвязь молекул предопределяет и многие другие, весьма любопытные свойства воды: вода в жидком состоянии на 10% плотнее льда. Почти все известные химические соединения, находящиеся в твердом состоянии, тонут в жидкости из того же вещества — это объяснимо с точки зрения интуитивной логики, поскольку в твердом веществе молекулы упаковываются в повторяющиеся правильные группы, тогда как в том же веществе, находящемся в жидком состоянии они располагаются хаотично. Представьте себе коробки с обувью

в кладовой обувного магазина. Ровные стопки и ряды коробок (именно так располагаются молекулы в кристаллических структурах) занимают гораздо меньший объем в пространстве, чем их беспорядочное нагромождение (так хаотично болтаются молекулы в жидкости). Но молекулы воды отличаются большей вязкостью, т. е. оказываются гораздо более плотно связанными в жидком виде, чем в упорядоченных кристаллах льда.

Важным следствием этого свойства оказывается плавучесть льда: в виде кубиков в стакане, льдин на реке или гигантских айсбергов в океане. Если бы не эта особенность, многие водоемы каждую зиму промерзали бы до дна, вместо того чтобы образовывать толстый защитный слой льда на поверхности воды. При таком абсолютном оледенении водные формы жизни в холодных регионах вряд ли смогли существовать, да и сам круговорот воды остановился бы. Любопытно отметить, что это свойство является одним из условий (может, не самым важным) для катания на коньках и на лыжах. Сильное давление лезвия конька на твердый лед сопровождается образованием на его поверхности тончайшего слоя жидкой воды, благодаря которому коньки скользят по льду. При слишком низкой температуре (обычно ниже –73 °C) жидкая водяная смазка не образуется, что сильно затрудняет скольжение конька или лыжи.

Еще одним отличительным свойством «чистой» воды является ее недостаточная чистота. Независимо от самой тщательной фильтрации или дистилляции, вода никогда не состоит только из молекул H_2O. Некоторая часть молекул, состоящих из трех атомов, неуклонно распадается на положительно заряженные ионы водорода (гидроны, или ионы H^+, которые на самом деле представляют собой независимые, положительно заряженные протоны без каких-либо электронов вообще), а также отрицательно заряженные гидроксильные ионы (ионы OH^-). Гидроны быстро присоединяются к молекулам воды, образуя ионы гидроксония H_3O^+. То, что мы называем чистой водой при комнатной температуре, содержит примерно одинаковое количество ионов гидроксония и отри-

цательно заряженных гидроксильных ионов, в химических терминах это и есть pH = 7 (можно сказать, что «сила водорода» составляет 10^{-7} моль/л).

Две важные, но малоизученные характеристики первичных океанов Земли — pH и содержание солей представляют особый интерес для исследователей. Вода легко растворяет любые примеси, как положительно заряженные ионы натрия (Na^+) или кальция (Ca_2^+), так и отрицательно заряженные ионы хлора (Cl^-) или карбоната (CO_3^{2-}). В общем случае совокупный электрический заряд любого объема водного раствора должен быть равен нулю: общее число положительных зарядов должно быть уравновешено адекватным числом отрицательно заряженных частиц. В чистой воде комнатной температуры 10^{-7} молей H_3O^+ нейтрализуются 10^{-7} молей OH^-. Однако в кислотах требуется избыток H_3O^+, чтобы нейтрализовать отрицательные ионы (например, хлора в соляной кислоте HCl). В щелочной среде дополнительное количество OH^- требуется для нейтрализации положительно заряженных ионов (например, натрия в гидроокиси натрия NaOH).

Концентрация кислотных и щелочных компонентов определяется по шкале pH. Низкие значения pH указывают на кислотные примеси, где ионов H_3O^+ больше, чем ионов OH^-. Жидкость с небольшой кислотностью со значением pH = 6 (типично для необработанной питьевой воды во многих регионах) содержит в десять раз больше ионов гидрония, чем нейтральный раствор со значением pH = 7. Вот примеры жидкостей с большей кислотностью: кофе (pH = 5, H_3O^+ в 100 раз больше), уксус (pH = 3, H_3O^+ в 10 тыс. раз больше), лимонный сок (pH = 2, H_3O^+ в 100 тыс. раз больше). А вот, напротив, примеры жидкостей, в которых ионы OH^- преобладают над ионами H_3O^+ и значение pH которых больше 7 — это типичные щелочи, такие как пищевая сода (pH = 8,5), гидроксид магния (лекарство от изжоги, pH = 10) и домашние моющие средства (pH = 12). Ниже мы увидим, что показатели pH и солености первичного океана Земли являются остродискуссионными вопросами.

Вода, вода, кругом вода

Одно из самых распространенных в космосе веществ — это вода. Куда бы мы ни обратили свой взгляд, повсюду встречается вода. Ее наличие на планетах, спутниках и кометах объясняет, почему же воды так много на Земле, а также указывает на возможность присутствия жизни в космосе, поскольку вода и жизнь тесно связаны между собой. Наблюдения в телескопы могут быть обманчивыми, поскольку обилие воды в нашей атмосфере искажает представление о наличии воды на отдаленных объектах. Тем не менее в глубоком космосе на некоторых космических объектах обнаруживается ледяной покров — его определяют по выраженному поглощению замерзшей водой инфракрасных лучей.

Этот спектроскопический след показывает, что значительные объемы замерзшей воды встречаются на некоторых кометах и астероидах. Астрономические исследования зафиксировали множество ледяных миров в пределах Солнечной системы — от Плутона с его небесным спутником Хароном до Сатурна с его сверкающими ледяными кольцами. Все газовые гиганты, изначально состоящие из водорода и гелия, в своих плотных атмосферах содержат значительные запасы водяного пара. На громадных спутниках Юпитера Европе и Каллисто, предположительно, под многокилометровым покровом льда находятся еще более глубокие океаны воды.

Ближние к нам планеты земного типа, на первый взгляд, кажутся безводными. Однако благодаря наблюдениям с помощью запущенного НАСА на Меркурий космического аппарата Messenger обнаружились солидные отложения льда в холодных полярных кратерах, дна которых не достигают лучи Солнца. Следующая планета, Венера, возможно, вначале имела запасы воды, сопоставимые с земными, но в настоящее время воды на ее поверхности, скорее всего, почти нет. Ее раскаленная углекислая атмосфера свидетельствует о безудержном парниковом эффекте и о давно исчезнувшей поверхностной воде, когда-то существовавшей на планете.

Совершенно иная картина открывается на Марсе, где белые шапки полярного льда то увеличиваются, то уменьшаются в соответствии с 687-суточным марсианским годом. По мнению астрономов, на Красной планете вполне может быть вода, а значит, и жизнь. В 1870-е гг., во время сильного сближения Марса и Земли, итальянский астроном Джованни Скиапарелли зафиксировал темные линейные объекты, которые он интерпретировал как естественные долины, возможно, произведенные работой воды, по-итальянски — canali. В переводе это слово было ошибочно передано как «каналы», что означает высокотехнологичные инженерные сооружения, и это породило устойчивое мнение о наличии на Марсе разумной жизни. Наиболее горячим приверженцем этой идеи был гарвардский астроном Персиваль Лоуэлл, буквально одержимый открытиями Скиапарелли. Он потратил все семейное состояние на постройку обсерватории во Флагстаффе, штат Аризона, и там занимался исключительно наблюдениями за Марсом. Пользуясь новейшим 60-сантиметровым телескопом и ясным аризонским небом, он полагал, что сумеет разрешить загадку сети каналов, протянувшихся от полярных ледников к засушливой зоне экватора. В своих чрезвычайно популярных книгах: Mars (1895), «Марс и его каналы» (Mars and Its Canals, 1905) и «Марс как прибежище жизни» (Mars as the Abode of Life, 1908) Лоуэлл описывает последнее отчаянное техническое достижение расы, исчезнувшей вследствие недостатка воды.

Красочные фантазии Лоуэлла породили целую волну научно-фантастических романов и рассказов (включая классическую «Войну миров» Г. Уэллса в 1898 г.), но так и не сумели убедить научное сообщество, что на Марсе имеется вода, тем более жизнь. Несмотря на более чем вековую историю исследований с использованием все более и более мощных телескопов, а также с запуском на Марс сложнейшей техники: зондов (начиная с Mariner-4 в 1965 г.), искусственных спутников (первым из них стал Mariner-9 в 1971 г.) и посадочных модулей (начиная с Viking в 1976 г.), убедительных доказательств наличия на Марсе источников воды и водоемов так и не было получено.

В конце 1970-х гг. путем спектрального анализа с помощью Viking было документально зафиксировано наличие водяного льда в северной полярной зоне, но только в 2000-е гг., благодаря применению сложнейших приборов на последнем поколении искусственных спутников, а также манипуляторов на зонде Phoenix и марсоходах Spirit и Opportunity было подтверждено наличие огромных запасов воды и условий ее залегания на Марсе.

В настоящее время большая часть водных запасов Марса состоит из зон вечной мерзлоты и, возможно, грунтовых вод в более теплых регионах — потенциальные водоемы, которые пока остаются изолированными от поверхностного сухого слоя. Признаки наличия таких глубинных резервуаров были обнаружены в 2002 г. с помощью высокоточного нейтронного спектрометра*, установленного на зонде Odyssey, запущенном к Марсу. Космические лучи, обстреливая поверхность Марса, способны выбивать нейтроны из водородосодержащих (а значит, и водоносных) отложений. Спектрометр разработан для обнаружения таких нейтронов на обширных территориях марсианской поверхности, от экваториальных зон до высоких широт. Однако эти интригующие результаты вызвали не меньше вопросов, чем дали ответов, поскольку таким образом невозможно было определить характер агрегатного состояния воды — жидкость это, лед или часть минерального соединения.

В 2007 г. запущенная НАСА многофункциональная автоматическая космическая станция Mars Reconnaissance Orbiter, используя радар, способный «видеть» сквозь грунт, представила изображение в достаточно высоком разрешении скрытой в глубинах Марса воды. Эти новаторские исследования обнаружили скопления льда размером с ледники в умеренных широтах южного полушария. Позднее европейская космическая станция Mars Express Orbiter, используя аналогичный радар, обнаружила глубинный лед на большей части территории планеты. В зонах, близких к южному полюсу, зафикси-

* Детектор нейтронов был изготовлен в России в Лаборатории космической гамма-спектроскопии ИКИ РАН. — *Прим. ред.*

рованы ледники толщиной более полукилометра. Поистине, Марс может располагать объемом воды в виде льда, которая могла бы покрыть всю планету океаном глубиной несколько сотен метров. Возможно, когда-то на Марсе существовали родственники земных океанов.

Наличие воды также может быть установлено по присутствию особых горных пород и минералов. Посадочный модуль Phoenix (НАСА), а также марсоходы Spirit и Opportunity обнаружили многочисленные дополнительные доказательства в виде минералов, образованных при взаимодействии горных пород с водой. В приповерхностных отложениях Марса часто встречаются водосодержащие глинистые минералы, и, возможно, именно они являются тем богатым источником водорода, который был обнаружен ранее с помощью нейтронного спектрометра. Эвапориты, минералы, которые обычно встречаются на месте высохших озер и морей, так же часто встречаются на Марсе, как и опал — слабо кристаллизованная разновидность кварца, которая обычно образуется при просачивании горячей воды сквозь осадочные породы.

Используя новые подходы к исследованию Красной планеты, ученые находят все больше и больше доказательств, что в былые времена на поверхности Марса была вода. Фотографии высокого разрешения показывают древние русла рек и промоины с разбросанными валунами, каплевидные острова, оползни и сеть проток. Эти формы рельефа врезаются в осадочные отложения, которые ранее, видимо, были отложены мелководными озерами или морями. Ведь террасы, похожие на морские, которые охватывают северное полушарие Марса, указывают на то, что когда-то этот регион мог быть больше чем на треть покрыт океаном. Если все обстояло так, то менее разогретый Марс, возможно, за миллионы лет до Земли был голубой планетой, пригодной для жизни.

И наконец, Луна — ключ к пониманию того, как сформировалась вода на ее большом брате — Земле. С общепринятой точки зрения, Луна сухая, как кость (на самом деле она даже суше кости, которая сохраняет в себе довольно много воды

даже жарясь в пустыне на солнце). Многие данные подтверждают степень сухости Луны: земные телескопы не фиксируют характерного инфракрасного поглощения; в составе образцов лунного грунта, собранных «Аполлонами» со всех шести мест посадки, не обнаруживается следов воды (с учетом возможностей аналитического оборудования 1970-х гг.); находка железа, пролежавшего на поверхности Луны более четырех миллиардов лет, без признаков ржавчины, исключает малейшую возможность наличия агрессивной воды.

Хотя общепринятая точка зрения — вещь своеобразная. Наступает момент, и находится человек, подвергающий сомнению то, что всеми принималось за истину, и порой это приводит к интересным открытиям. В 1994 г. единственный полет Clementine предоставил радиолокационные измерения, показавшие наличие замерзшей воды, но это мало кого убедило. Четыре года спустя на Lunar Prospector была использована нейтронная спектроскопия, что позволило выявить значительную концентрацию атомов водорода, а следовательно, и вероятное наличие водяного льда или водосодержащих минералов поблизости от полюсов Луны. Но многие эксперты все же указали на солнечный ветер — как на более вероятный источник атомов водорода. В октябре 2009 г. специалисты НАСА спланировали падение последней ступени ракетоносителя Atlas в один из лунных кратеров (кратер Кабеус, вблизи южного полюса Луны) и тщательно исследовали шлейф обломков на содержание воды. Как и предполагалось, вынесенная пыль включала небольшое, но различимое количество животворящей влаги — вполне достаточное для возобновления интереса к вопросу о существовании воды на Луне. В том же октябре журнал *Science* опубликовал три статьи подряд, утверждающих, что теперь существует бесспорное доказательство наличия воды на Луне.

Здесь на сцену вышел Эрик Хаури с коллегами из Института Карнеги. Используя ионный микрозонд — высокочувствительный прибор, не существовавший во времена первого поколения ученых, исследовавших образцы лунного грунта, —

команда Хаури вернулась к исследованию цветных стеклянных шариков, вроде тех лунных образцов, с которыми я впервые работал в далеком 1976 г. Лет за десять до Хаури эти шарики изучали на наличие признаков воды другие ученые, но приборы, бывшие в их распоряжении, не могли соперничать в точности с ионным микрозондом, с помощью которого можно вести измерения в масштабе одной тысячной миллиметра. Хаури и его коллеги пришлифовали «бисерины» таким образом, что в ионном зонде стало возможно увидеть их концентрические структуры. Наружный слой образца содержал очень мало воды — одну миллионную объема, но сердцевина крупнейших образцов содержала в сто раз больше воды. За миллиарды лет большая часть воды, содержавшейся вначале в стеклянных бусинах, испарилась в космос, причем с поверхности в большей степени, чем из сердцевины. Как бы то ни было, учитывая факт значительного содержания оставшейся внутри воды, Хаури с коллегами считают, что исходное содержание воды в лунной магме было не менее 750 миллионных объема — огромное количество воды, сопоставимое со многими вулканическими породами на Земле и более чем достаточное для вулканической активности, в ходе которой взрывные извержения вулканов выбрасывали магму на поверхность миллиарды лет назад.

Если вулканы Луны в прошлом извергались под воздействием воды, то где-то внутри мерзлых лунных недр должны храниться огромные массы H_2O. Поскольку Луна образовалась из откололовшегося при столкновении с Тейей куска земной мантии, можно предположить, что наша планета также располагает громадными скрытыми запасами воды глубоко внутри.

Зримый круговорот воды

Сколько бы воды мы ни обнаружили на Луне или на Марсе (похоже, ее там много), единственным водным миром в Солнечной системе остается Земля. Рассказ о земной воде — ее запасы на планете, в каких формах она существует, где находится и как перемещается — дело нелегкое. Еще в 1990-е гг.

считалось, что океаны являются самым крупным хранилищем воды, вмещающим около 96% всей водной массы Земли. На втором месте с большим отрывом располагаются ледяные шапки и ледники, которые на сегодня содержат примерно 3% (и, вероятно, не более 5–6% во времена расползания ледников на пике ледникового периода). Грунтовые воды (вся близкая к земной поверхности вода, как в хорошо очерченных водоносных слоях, так и в дисперсном виде) составляют примерно 1%, тогда как вода озер, рек, ручьев, прудов и атмосферы, вместе взятых, составляет не более сотых долей процента всей поверхностной воды на Земле.

Вся эта вода находится в постоянном движении, перемещаясь из одного водоема в другой за временной интервал от дней до миллионов лет. Динамичный, поддерживающий земную жизнь круговорот воды является самой очевидной причиной изменений на нашей вечно меняющейся планете. Представьте себе перемещение одной-единственной молекулы H_2O — молекулы, состоящей из одного атома кислорода и двух атомов водорода, — возрастом много миллиардов лет. Начнем прослеживать путь нашей молекулы из могучего Тихого океана, где наибольшая часть приповерхностных молекул воды проводит весь отпущенный им срок существования. Мощное и холодное Калифорнийское океанское течение уносит эту молекулу от побережья Аляски на юг, вдоль побережья Калифорнии до Байи и далее к экватору. По мере прогрева и подъема глубинных слоев наша молекула поднимается почти к поверхности океана и начинает грандиозное путешествие по часовой стрелке вокруг северной части Тихого океана — вначале в Северном экваториальном течении, по направлению на запад, огибая Японию, затем в Северном тихоокеанском течении, направляясь на восток к Северной Америке. Когда наша молекула снова оказывается вблизи Калифорнии, она окончательно поднимается на поверхность океана и испаряется в атмосферу, где участвует в образовании облаков.

Преобладающие ветры несут массу дождевых облаков на восток, пересекая пустынный Юго-Запад в направлении

Скалистых гор. По мере того как облака поднимаются в более холодные слои атмосферы, они начинают проливаться дождем. В конце концов, наша молекула достигает земной поверхности в составе дождевой капли; извилистым путем она переходит из ручейка в ручей, затем в речушку, затем в полноводную реку. До этого момента молекула двигается быстро — примерно год-два уходит на пересечение Тихого океана, день-другой на подъем к облакам и выпадение вместе с дождем, около недели на пересечение холмистой местности вместе с потоком. Однако, погрузившись в почву, она попадает в обширный водоносный горизонт и может провести там тысячи лет, путешествуя в подземном царстве.

Здесь вмешательство человека нарушает естественный природный ритм, поскольку необходимость в воде заставляет фермеров выкачивать колоссальные объемы грунтовых вод для поддержания земледелия в засушливом регионе Юго-Запада США. Наша молекула снова оказывается на поверхности и через поливальные установки попадает на кукурузные поля Техаса, где быстро испаряется, устремляясь в безоблачное техасское небо, продолжая путешествие на восток.

Эта история продолжается бесконечно. Некоторые молекулы временно распадаются на ионы — гидронии и гидроксилы, но потом снова собираются в новые молекулы воды в компании с другими атомами. Некоторые молекулы могут вмерзать в толстый ледовый покров Антарктики, где застревают на миллионы лет. Другие под воздействием различных химических реакций становятся частью глинистых минералов в составе почвы.

Живая природа также стала неотъемлемой частью круговорота воды. Растения поглощают молекулы воды и углекислого газа и под воздействием солнечных лучей соединяют их в ходе фотосинтеза, необходимого для роста корней, стволов, листьев и плодов. Богатые питательными веществами растительные ткани идут на корм животным и, подвергаясь метаболизму под воздействием дыхательных процессов, превращаются в продукты жизнедеятельности, в частности,

снова выпускаемые с каждым выдохом молекулы углекислого газа и воды.

Подземный круговорот воды

С середины 1980-х гг. ученые начали всерьез задумываться о мировых запасах воды, поскольку они явно не исчерпываются приповерхностной водой. Поскольку нам известно, что подземные массы магмы содержат достаточное количество воды для поддержания вулканической деятельности, можно сделать вывод, что силикатные минералы, кристаллизованные глубоко в недрах Земли, каким-то образом улавливают молекулы H_2O. Значит, должен существовать скрытый в недрах круговорот воды, который мог бы многое поведать нам о том, как и когда Земля превратилась в омываемую океанами планету, каковой она является в наше время.

Экспериментальный подход к исследованию глубинных вод строился на предположении, что наиболее распространенные минералы мантии — оливин, пироксен, гранат и их более плотные подземные разновидности — могут содержать в своем составе некоторое количество воды. В 1990-е гг. экспериментальное выявление наличия воды в «заведомо безводных» минералах стало главным содержанием минералогии высоких давлений и дало удивительные результаты. Выяснилось, что под воздействием высоких давлений и температур некоторые минералы с легкостью поглощают многочисленные атомы водорода, которые с минералогической точки зрения являются эквивалентом воды (поскольку в таких минералах атомы водорода соединяются с кислородом). Минералы, которые в условиях земной коры, куда они попадают в момент извержения вулканов и где господствуют низкие давления и температуры, неизменно остаются безводными, тогда как в глубинных слоях мантии они способны поглощать влагу.

Вообще техника эксперимента довольно проста. Берем образец оливина или пироксена, добавляем воду, нагреваем их под высоким давлением и наблюдаем, что при этом проис-

ходит с водой. На практике дело обстоит совсем не так просто. Для воспроизведения условий нижних слоев земной мантии образец должен подвергнуться давлению в сотни тысяч атмосфер и одновременно нагреву не менее чем до 2000 °C. Для совершения такой непростой операции исследователи применяют два различных подхода.

Одни предпочитают массивные прессы величиной с комнату, способные оказывать многотонное давление на крохотный образец — усовершенствованные разновидности «бомбы», которой пользовался Йодер полстолетия назад. Агрегат состоит из четырех вложенных друг в друга конструкций наподобие матрешки: каждая конструкция окружает меньшую по объему, фокусируя высокое давление на объеме, который становится все меньше и меньше. Снаружи две гигантские металлические плиты сдавливают внутренние части установки сверху и снизу с силой в тысячи тонн. Эти внешние плиты давят на вторую конструкцию, состоящую из шести изогнутых стальных частей — три сверху и три снизу, которые равномерно сдавливают третью конструкцию, представляющую собой куб из восьми карбид-вольфрамовых пластин. Сам образец минерала в виде пыли плюс вода находится в четвертой, внутренней конструкции — контейнере, чаще всего с золотой или платиновой внутренней поверхностью, чтобы не допустить выдавливания образцов за пределы контейнера. Для усиления эффекта давления контейнер с образцом и водой снабжен внутренним электрическим нагревателем, и температура нагрева измеряется непрерывно с помощью тончайшей проволочной термопары.

Другой популярный экспериментальный подход для воссоздания условий земной мантии основывается на применении камеры с алмазной наковальней, которая обеспечивает мощное давление путем сжатия двух алмазов с плоскими поверхностями. Берем два алмаза бриллиантовой огранки размером полкарата, вроде камушков в обручальном кольце, и полируем их острые концы, чтобы создать плоскую круглую поверхность полмиллиметра в диаметре — это и образует опорные плоско-

сти наковален. Затем помещаем алмазы в сверхточно отрегулированные металлические тиски, установив между ними тонкий лист металла с небольшим отверстием в центре. Центруем отверстие между двумя алмазными кристаллами, загружаем в него минеральный образец и воду и сжимаем тиски. Благодаря крошечной площади наковален удается достичь огромного давления. Камеры с алмазными наковальнями установили рекордное давление до 3 млн атмосфер, равное тому, что наблюдается в земном ядре. При этом прозрачные ограненные алмазы позволяют наблюдать за образцом в процессе давления. Так что эксперимент сопровождается использованием полного набора спектроскопических измерений, а нагрев до температур мантии легко осуществляется мощным лазером, луч которого хорошо проходит сквозь алмазные поверхности наковален.

Если эксперимент получается — достигаются и поддерживаются необходимые давление и температура, термопара не разрушается, а образец не выдавливается, — начинается решение хитроумных аналитических задач. Водосодержащие минералы вроде глины или слюды распознаются легко, но как измерить миллионные доли воды в составе сухого образца? В некоторых случаях применяется ионный зонд; именно его высокая чувствительность и пространственное разрешение позволили Эрику Хаури обнаружить признаки воды в лунном вулканическом стекле. Другим хорошим способом является инфракрасная спектроскопия, которая позволяет проследить характерные связи между кислородом и водородом. Возникшие между водородом и кислородом новые соединения изменяют характер взаимодействия инфракрасного излучения и кристалла, и благодаря этим сдвигам можно отследить попадание воды в структуру минерала. Однако осторожные коллеги (и недоверчивые конкуренты) непременно усомнятся в том, что эксперимент безупречен, а аналитические приборы достаточно чувствительны. Единственное включение жидкости — частичка воды, неразличимая под микроскопом, может дать ложный сигнал при всей изощренности измерений.

Как все новое в науке, такие эксперименты потребовали времени, чтобы получить признание, но чем больше проводилось наблюдений, тем больше минералов из глубин земной мантии обнаруживали способность удерживать воду. Относительно безводными являются минералы нижнего слоя земной коры — оливин и пироксен, содержащие не более 0,01% воды. Но стоит повысить давление до 100 000 атмосфер, а температуру до 1000 °C, характерных для мантии, как оливин трансформируется в вадслеит, способный удерживать до 3% воды. Соответствующий слой, переходная зона земной мантии на глубине от 410 до 659 км, является одним из самых «обводненных» мест на планете и, возможно, содержит в девять раз больше воды, чем все океаны на поверхности. Минералы нижнего слоя мантии менее насыщены водой, но зато значительно превышают в совокупности объем минералов на Земле в целом, составляя примерно половину всего земного вещества, так что, по некоторым оценкам, эта область содержит в 16 раз больше воды, чем океаны. С учетом возможности существования других водонасыщенных минералов, а также вероятного наличия большого количества водорода в железном ядре, в недрах планеты могут содержаться запасы воды объемом более восьмидесяти океанов.

Первый океан

По самым осторожным оценкам, начальные запасы летучих веществ на Протоземле более чем в 100 раз превышали их нынешний объем на Земле. Одна из основных проблем в исследовании летучих элементов заключается в том, чтобы определить, сколько их было и как они исчезли.

Кое в чем мы можем быть уверены. С самого первого дня огромное количество летучих веществ выбрасывалось наружу по мере того, как громадные вулканы извергали из глубин Земли гигантские клубы пара в стремительно густеющую атмосферу. В первые несколько миллионов лет существования Протоземли ее атмосфера была во много раз плотнее, чем сейчас.

На протяжении миллионов лет из нее на поверхность планеты обрушивалась вода, охлаждая первую твердь и образуя обширные, но мелкие океаны.

А затем Великое столкновение сдуло прочь всю атмосферу. Почти все молекулы, оказавшиеся на поверхности, исчезли в космическом пространстве, словно кто-то нажал гигантскую кнопку перезагрузки. У нас нет достоверных данных, какие объемы азота, воды и других летучих элементов при этом испарились, но явно колоссальные. В течение последующих пяти миллионов лет множество небольших каменных глыб, около 150 км в диаметре, обрушивались на поверхность Земли, вызывая невообразимые разрушения, и каждый раз при этом испарялась значительная часть океанов, уменьшая запас летучих веществ.

И все же в течение нескольких миллионов лет после Великого столкновения водяные пары снова стали основным компонентом первозданной атмосферы, где постоянно бушевала буря, клубились темные тучи, завывал ветер, сверкали молнии и беспрерывно шел проливной дождь. Омываемая ливнями базальтовая кора остывала и твердела, а глубокие провалы постепенно заполнялись водой, образуя океаны. На какое-то время над земной поверхностью сформировалась глобальная сауна, поскольку тонкая пленка поверхностной воды проникала в трещины и расщелины, попадая на раскаленные камни земных недр и возвращаясь на поверхность в виде колоссальных гейзеров из пара и перегретой воды. Такое интенсивное взаимодействие воды и раскаленных камней ускоряло охлаждение коры, образуя все более глубокие водоемы, озера, океаны.

Невозможно подсчитать, сколько времени понадобилось на формирование Мирового океана, но свидетелем этого процесса оказываются древнейшие на земле кристаллы. Некоторые из самых древних горных пород можно обнаружить в слоях осадочных отложений, возрастом более трех миллиардов лет, вскрывающихся в районе горного массива Джек-Хиллс среди засушливых плоскогорьев Западной Австралии. Минералы

и горные породы размерами с песчинку, которые слагают эти отложения, образовались в процессе эрозии давно исчезнувших массивов гораздо более древнего возраста. Малая часть этих песчинок, примерно одна на миллион, состоит из циркона — силиката циркония ($ZrSiO_4$), одного из прочнейших в природе материалов.

Отдельные зерна циркона, размером меньше точки в конце предложения, первоначально сформировались как акцессорные минералы вулканических пород. Представьте себе твердеющий расплавленный базальт, в котором содержатся только следовые количества циркония. Большинство химических элементов, редких или распространенных, легко входит в кристаллические структуры пироксена, оливина или полевого шпата. Но цирконию нет места в обычных минералах. Он стремится обособиться, образуя обособленные крошечные кристаллики.

Эти неприметные кристаллики циркона в силу целого ряда обстоятельств стали уникальным источником сведений о ранних стадиях развития Земли. Во-первых, цирконы могут существовать практически вечно (по крайней мере пока существует Земля). Единичный кристалл циркона вымывается из одной породы (возможно, из вулканического вещества, где он изначально образовался), потом становится частью осадочного слоя песчаника, затем выветривается из него снова и снова — и так продолжается миллиарды лет. Одно и то же зерно циркона может пройти через десяток различных, последовательно образующихся и разрушающихся осадочных пород.

Во-вторых, по кристаллам циркона можно определять геологический возраст, поскольку они часто включают уран, который может составлять примерно 1% от общего числа их атомов. Радиоактивный уран с периодом полураспада в 4,5 млрд лет является самым точным секундомером в природе. Как только кристалл циркона сформировался, атомы урана оказываются запертыми в нем и начинают распадаться с постоянной скоростью; половина из них распадается в среднем за 4,5 млрд лет, при этом каждый трансформируется в стабильный атом свинца.

Соотношение распадающихся материнских атомов урана и образующихся дочерних атомов свинца позволяет точно определить возраст кристалла циркона.

Наконец, два из каждых трех атомов циркона состоят из кислорода, что позволяет определить температуру образования кристалла. Вспомним, что одним из свидетельств образования Луны оказалась характерная пропорция устойчивых изотопов кислорода: Луна и Земля имеют одинаковое соотношение кислорода-16 к кислороду-18, что свидетельствует о том, что они образовались на равном удалении от Солнца. Подобным же образом, через соотношение кислорода-16 и кислорода-18, можно определить температуру, при которой образовался кристалл циркона: более тяжелые образцы, обогащенные кислородом-18, указывают на более низкую температуру образования. Для вулканических пород такая температура может служить показателем содержания воды в магме, в которой вырос кристалл циркона, потому что вода снижает температуру кристаллообразования. Более того, соотношение изотопов в воде, близкой к поверхности, тяготеет к преобладанию тяжелого кислорода, так что кристаллы циркона с высоким содержанием кислорода-18, с большой долей вероятности, взаимодействовали с поверхностной водой.

Таким образом, кристаллы циркона в древнейших горных породах могли пережить много циклов отложения и эрозии, сохраняя данные о возрасте, температуре и наличии воды в окружающей среде во время образования. Всю эту информацию хранят кристаллы, едва заметные невооруженным глазом!

Подводя общий итог, можно сказать, что многие кристаллы циркона из горного массива Джек-Хиллс в Австралии имеют одинаковый возраст, превышающий 4 млрд лет, но возраст одного самого древнего зерна приближается к умопомрачительным 4,4 млрд лет. Этот древнейший из известных кристаллов циркона — поистине самый старый из сохранившихся твердых фрагментов Земли — имеет поразительно богатый кислородом состав. Некоторые исследователи полагают, что 4,4 млрд лет назад, когда Земле было всего 150 млн

лет от роду, ее поверхность была сравнительно прохладной и сырой, следовательно, в то время существовали океаны.

Однако другие ученые не вполне согласны с этой гипотезой. Они указывают на то, что кристаллы циркона могут быть невероятно сложными: это зерно возрастом 4,4 млрд лет, как практически и все слегка более молодые собратья из Джек-Хиллс, обладает древним кристаллическим ядром. Детальное изучение строения отдельных кристаллов выявило наличие концентрических слоев более молодого циркона, выросшего вокруг более старых слоев. Совсем нередко бывает так, что наружная оболочка отдельного кристалла моложе его ядра как минимум на миллиард лет, что соответствует сложным вариациям содержания изотопов кислорода. Если более древнее ядро кристалла подвергалось изменениям в течение очередных стадий роста кристалла, то данные об истинном состоянии земной поверхности в далекой древности могут быть скрыты.

Как бы то ни было, в истории с цирконом большинство специалистов сходятся в том, что не более 100 млн лет спустя после Великого столкновения Земля превратилась в сверкающую голубой водой планету, покрытую океаном километровой глубины. Из космоса она, должно быть, выглядела ярко-голубым мраморным шаром, над которым вились отдельные белые облака, но в целом преобладал ультрамарин. (Цвет океана обусловлен простыми законами физики. Солнечный свет, отражаясь от поверхности воды, сочетает все цвета радуги — красные, желтые, зеленые и синие оттенки, но вода сильнее поглощает красную часть спектра, так что нашему зрению преимущественно предстают волны света из синей части спектра.)

А как же суша? Ныне почти треть земной поверхности составляют континенты, но на заре времен, в огненный гадейский период континенты еще не сформировались. Лишь кое-где среди волн первозданного голубого океана вздымались исходящие паром вулканические острова. Их конические очертания и узкие, черные щебнистые осыпи изредка нарушали однообразный водный простор между полюсами и экватором.

Обращаясь мысленно к опоясывающему Землю древнему океану, мы пытаемся вообразить, каким он был. Был ли он горячим? Возможно, в самом начале, учитывая медленно остывающий под ним океан магмы. Был ли он пресным или соленым? Вода современного океана отличается соленостью, но почему бы не предположить, что первоначальный океан на Земле был пресным, поскольку в воде тогда растворилось мало химических элементов, и лишь постепенно обретал нынешнюю соленость. Однако недавние исследования показывают, что горячий первоначальный океан очень быстро стал гораздо более соленым, чем сегодня. Обычная поваренная соль ($NaCl$) легко растворяется в горячей воде. В наше время около половины запасов соли Земли находится либо в соляных пластах, либо в иных соляных месторождениях на суше, представляя собой остатки испарившейся соленой воды. Большая часть этих соляных месторождений залегает глубоко под землей, но в первые полмиллиарда лет на Земле не было суши, в которой могли бы отложиться запасы соли. Следовательно, уровень солености Мирового океана в те времена по меньшей мере вдвое превышал современный. Более того, в той теплой воде в более высокой концентрации растворялись и другие элементы: железо, магний и кальций — составные части базальта.

Исследователи также предполагают, что гадейский океан мог быть по преимуществу кислотным или щелочным. Решающим фактором в этом вопросе, определяющим уровень pH и солености, является атмосферный углекислый газ. По всем данным, содержание углекислого газа в первоначальной атмосфере Земли в тысячи раз превышало сегодняшний показатель, который составляет около 0,04% (хотя с каждым годом этот показатель увеличивается). Высокая концентрация CO_2 в гадейской атмосфере означала и гораздо большее его содержание в воде, что должно было сказаться на уровне pH и солености. Углекислый газ, соединяясь с дождевой водой, образует углекислоту H_2CO_3. В океане карбонатный осадок частично распадается на ионы водорода, которые образуют гидронии и бикарбонат (HCO_3). Этот прирост положительных ионов водорода

придает океану кислотность, возможно не ниже pH = 5,5. Такой уровень кислотности, в свою очередь, ускорял выветривание базальта и других пород, насыщая и без того соленый океан.

Парадокс тусклого Солнца

Мало нам проблем с противоречивыми выводами о первоначальном океане, а тут еще одна загадка: согласно современным астрономическим наблюдениям и все более точным астрофизическим расчетам, звезды, подобные нашему Солнцу, на протяжении своего существования медленно, но неуклонно становятся все более яркими. По таким расчетам, молодое Солнце 4,4 млрд лет назад было на 25–30% менее ярким, чем сегодня. Более того, всего около 1,5 млрд лет назад свет нашего светила оставался недостаточно комфортным. Если сегодня Солнце внезапно потускнеет до такого состояния, Земля стремительно превратится в пустынный ледник: океаны покроются льдом от полюсов до экватора и все живое на Земле погибнет. При таком катастрофическом изменении климата выживут только самые выносливые организмы, подземные микроорганизмы и животные, обитающие в защищенных гидротермальных зонах поблизости от вулканов.

С учетом нежаркого раннего Солнца Земля должна была бы быстро обледенеть. И все же геологические данные недвусмысленно свидетельствуют об изобилии жидкой воды на ее поверхности по крайней мере 4 млрд лет назад. Часто встречаются осадки, отложенные как в мелких, так и в глубоких водоемах. Именно в этот период на Земле зародилась и окрепла жизнь. Как же могло получиться, что первоначальный океан оставался жидким?

Конечно, часть теплового дефицита при нежарком Солнце компенсировалась раскаленным состоянием самой Земли. Хотя образование поверхностной коры над магматическим океаном уже состоялось, обилие расплавленных горных пород и вулканическая активность в достаточной мере согревали

поверхность Земли. Поверхностный океан на согретой изнутри планете продолжал оставаться теплым даже в процессе остывания и утолщения земной коры.

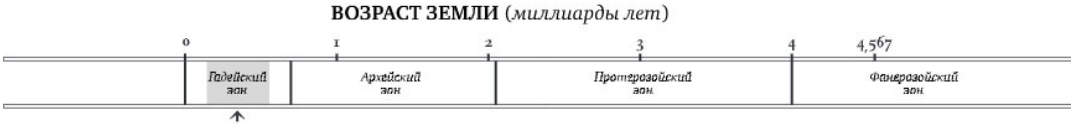
Популярная гипотеза, объясняя парадокс прохладного Солнца, указывает на мощный парниковый эффект, возникший под воздействием концентрации углекислого газа в атмосфере, возможно, раз в десять более плотной, чем в наше время (именно высокая концентрация CO_2 могла вызвать окисление океана и повысить его соленость).

Другой научный сценарий исходит из того, что Земля, сначала в черной фазе, затем в голубой, поглощала гораздо больше солнечной энергии, чем сегодня. В наше время океан поглощает больше света, чем суша, — возможно, вода первоначальных океанов отличалась более высоким содержанием железа. Это усиленное поглощение солнечной энергии сочеталось с недостаточной облачностью, которая способствует рассеянию света; в наши дни растения и химические элементы играют важную роль в образовании облаков, но миллиарды лет назад никаких растений, способных усилить процесс сгущения облачности, на Земле не было.

Существует и другая гипотеза, согласно которой важная роль отводится высокому содержанию парникового газа метана в атмосфере. Любопытным следствием концентрации метана в атмосфере могли стать химические реакции в верхних слоях атмосферы, в результате которых ультрафиолетовое излучение запустило синтез разнообразных органических молекул, включая составные элементы элементарных живых форм. Скопление таких органических молекул могло способствовать образованию толстого слоя тумана, превратившего голубую Землю в оранжевую планету, чем-то похожую на крупный спутник Сатурна — Титан.

Таким образом, не располагая точными данными о положении дел в те времена, мы имеем несколько возможных объяснений того, почему Земля не превратилась в обледеневший шар. Об одном можно утверждать с уверенностью: однажды возникший, Мировой океан сыграл важную роль в формирова-

нии структуры земной поверхности — в формировании рельефа, в эволюции минеральных веществ и в происхождении биосферы. Вода продолжает воздействовать на все стороны жизни как концентратор минеральных ресурсов, как главный фактор эволюции земной коры и как среда для всех видов жизни.



Глава 5

Серая Земля

Первичная гранитная кора

Возраст Земли: от 200 до 500 млн лет

Сегодняшняя Земля — это планета контрастов: одну ее треть занимает суша, две трети — вода; из космоса планета смотрится как смесь голубого, коричневого и зеленого цветов с завихрениями белого. Не так все выглядело 4,4 млрд лет назад, когда разбросанные повсюду симметричные конусы вулканов из черного базальта были единственными скудными островками суши, разнообразившими монотонную голубизну неглубоких морей. Картина изменилась с появлением гранита — грубой, шероховатой прочной основы континентов.

История Земли представляет собой процесс дифференцирования — разделения и концентрации элементов во все новые и новые породы и минералы, в моря и континенты и, наконец, в живые формы. Это повторялось раз за разом. Внутренние плотнотельные планеты — Меркурий, Венера, Земля и Марс — формировались в то время, когда интенсивные порывы солнечного ветра отделяли водород и гелий от более тяжелой шестерки элементов, выталкивая легкие газообразные элементы наружу, в область таких гигантов, как Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. На Земле тяжелое расплавленное железо

устремлялось к центру по мере того, как металлическое ядро отделялось от насыщенной перидотитом мантии. В результате частичного расплавления перидотита образовался базальт — порода, богатая кремнием, кальцием и алюминием, которая, отделившись от перидотита, сформировала первую, тонкую и черную земную кору. В результате извержений базальт выбрасывался на поверхность, а вода и другие летучие вещества отделялись от базальтовой магмы, создавая океан и атмосферу. Каждое извержение разделяло и вновь соединяло элементы, всякий раз ускоряя расслоение и увеличивая разнообразие веществ на планете.

Возникновение континентов стало следующим важным этапом эволюции Земли. По мере того как остывали внешние слои базальтовой коры, формировалась своего рода крышка, заслонка для все еще расплавленной магмы в нижних слоях. Базальт, нагреваемый снизу, снова начинал плавиться при сравнительно низких температурах, чему способствовало наличие воды, — примерно при 700 °C. Повышение температуры увеличивало объем расплавленного базальта: вначале расплавилось 5%, потом 10%, затем 25%. Одновременно плавился периодит, и в результате получилась магма, состав которой существенно отличался от начальной базальтовой породы. В новом сплаве заметно увеличивалось присутствие кремния, а также натрия и калия. В этой расплавленной жидкости также концентрировалась вода и такие редкие элементы, как бериллий, литий, уран, цирконий, тантал и многие другие. Вновь образованная кремнистая магма отличалась гораздо меньшей плотностью, чем базальт, а потому неминуемо пробивалась к поверхности, формируя первый гранит.

Большинство гранитов имеет простой минеральный состав — они состоят всего из четырех минералов. Прозрачные бесцветные кристаллы кварца — чистого оксида кремния — изобилуют в граните. Их жесткие зерна, выветриваясь, создали первые на Земле белые песчаные пляжи. Две разновидности полевого шпата, в составе которых преобладает либо калий, либо натрий, придавали первым земным гранитам однообраз-

ный серовато-белый оттенок. Кроме того, в каждом виде гранита присутствовали доли четвертого, темного железистого минерала — либо пироксена, либо слюды, а иногда удлиненные кристаллы амфибола. Приглядитесь к полированному граниту столешницы или облицовки зданий — и вы увидите там все четыре компонента.

Наличие более редких элементов может проявиться в крохотных зернах дополнительных минералов, например циркона, в котором сконцентрирован цирконий. В предыдущей главе уже упоминалось о мелких красных кристаллах циркона, извлеченных из осадочных пород в горах Джек-Хиллс в Австралии, указывающих на существование первоначального океана 4,4 млрд лет назад. Те же самые кристаллы, образованные в более прохладной, влажной среде, могут указывать на ранние сроки формирования гранита. Цирконы из Джек-Хиллс не только содержат тяжелые изотопы кислорода, подтверждающие наличие воды и относительно прохладных температурных условий их формирования, но и включают отдельные вкрапления кварца (в основном, кристаллы возрастом 4 млрд лет) — минерала, чрезвычайно редко встречаемого до образования гранитов. По мнению некоторых специалистов, эти древние, охлажденные кристаллы циркона, содержащие кварц, являются последними сохранившимися остатками древнейшей гранитной коры.

Происхождение гранита является первым свидетельством отличия эволюции минералов Земли от эволюции минералов на соседних планетах. Образование гранита требует огромного количества базальта, располагающегося близко к поверхности планеты, а также интенсивного источника внутреннего тепла, способного его расплавить. Планеты меньшего размера, Марс и Меркурий, а также спутник Земли Луна тоже покрыты базальтовой корой, но они слишком малы, чтобы образовать большое количество гранита. Им недостает внутреннего источника тепловой энергии. Несомненно, и на этих планетах образовалось какое-то количество гранита, но оно не идет ни в какое сравнение с глубоко укорененными гранитными континентами Земли.

Плавучесть

Зачаточная земная кора из черного базальта, размягчаемая теплом, идущим из недр планеты, плотность которой была раза в три больше воды, не могла обеспечить устойчивый рельеф. Вулканические извержения километр-два высотой могли образовать разбросанные на значительном расстоянии черные острова, но до образования континентов на Земле не существовало ни крупных горных массивов, ни глубоких океанских впадин. Гранит со своей сравнительно низкой средней плотностью (в 2,7 раза плотнее воды) сыграл решающую роль. Гранит неизменно всплывает поверх базальта и перидотита; он образует крупные нагромождения, вздымаясь на несколько километров над поверхностью, подобно айсбергу. Лед, будучи на 10% легче воды, может служить аналогом. Из-за этой разницы не более 10% объема айсберга возвышается над водой. Зазубренный айсберг высотой метров 60 может подниматься над водой всего на 10 м — в результате мы можем наблюдать так называемую «верхушку айсберга». По той же причине гранит, плотность которого на 10% меньше, чем у базальта, всплывает над его поверхностью в аналогичной пропорции.

Итак, базальтовая кора Земли плавилась, образуя гранитные слои один над другим, начали формироваться похожие на верхушки айсбергов выступы над поверхностью. Гранитный слой толщиной 1,5 км мог возвышаться над уровнем базальтовой коры почти на 300 м. Однако со временем масса гранита увеличилась, и ее толщина достигла многих километров; соответственно континентальные массивы все выше поднимались над океаном, а некоторые горные гряды вздымались над поверхностью воды на тысячи метров. Ныне цепь Скалистых гор на западе Америки, гранитные корни которых уходят в глубину более чем на 60 км, включает отдельные пики до 4 км высотой. Этот становой хребет Американского континента возвышается как свидетельство плавучести гранита.

В 1970 г., когда я учился на геологическом факультете MIT, выталкивающая сила как основа геологических изменений

была незыблемым правилом во всех учебниках. (Мы пользовались 2-м изданием книги британского геолога Артура Холмса «Основы физической геологии»*, выпущенной в 1965 г. и прекрасно иллюстрированной.) Это явление называлось «изостазия». Ведущая сила «вертикальной тектоники» называлась «изостатическим равновесием». Замечательная гравюра, почти без изменений перешедшая из учебников геологии XIX в., изображала ряд прямоугольных деревянных блоков, плавающих в воде. Более объемные блоки больше возвышались над водой, подобно горам. Мы узнавали, как океанические бассейны заполнялись толстыми слоями отложений, а эти отложения плавились, образуя гранитные массивы. Мы изучали, как на основе этих плавучих гранитных основ постепенно вырастали горы. В то время это звучало вполне убедительно, и до сих пор эта гипотеза преобладает в представлении о том, как более 4 млрд лет назад сформировалась земная кора.

На ранних этапах истории Земли, возможно, в первые две сотни миллионов лет, над огненной поверхностью начали формироваться небольшие плавучие серые гранитные массивы, а в глубине под ними частично плавился базальт. В те времена вертикальная тектоника и изостазия преобладали, как и утверждал Артур Холмс. Эти первые континентальные голые островки гранита омывались всеми волнами и овевались всеми ветрами. Выветривание кристаллов кварца медленно формировало узкие полоски песчаных берегов, а отложения полевого шпата превращались в скудную глинистую почву. Первые разрозненные гранитные острова отличались малыми размерами, поднимались невысоко над поверхностью океана — и ничто не предвещало, что они превратятся в будущие континенты.

Повторный удар?

И все-таки как же испещренная вулканами, базальтовая Земля превратилась в планету с обширными гранитными континен-

* Холмс А. Основы физической геологии. — М.: Издательство иностранной литературы, 1949.

тами? Как несколько первых одиноких гранитных островков разрослись в громадные массивы суши, заполнившие оба полушария? Ученые выдвигали самые невероятные гипотезы. Одна из распространенных идей не отличалась оригинальностью: формирование континентов обусловлено случайностью — ударом астероида.

Действительно, в течение миллиарда лет после уничтожения Тейи и образования Луны время от времени Землю атаковали астероиды. Это неопровержимый факт. По оценкам экспертов, десятки крупных астероидов более сотни километров в диаметре, блуждающие остатки какой-нибудь планеты раннего периода, сталкивались с Землей в эпоху ее формирования. Представим себе, как 4 млрд лет назад потоки расплавленного камня поднимаются сквозь тонкую поверхность первичного океана. Десятки, если не сотни, таких огненных гейзеров вздымались из недр Земли, создавая конвекционный оборот тепловой энергии. Гигантские вулканы изрыгали базальтовую лаву, а расплавленная базальтовая кора тем временем порождала граниты, утолщая земную твердь.

И вдруг происходит катастрофа: 50-километровый астероид обрушивается на вулканический остров, уничтожая всякую твердую почву на сотни километров вокруг. Этот удар порождает гигантское озеро магмы, одновременно заваливая прилегающую к озеру поверхность сгустками расплавленной лавы и осколками камней. Космический пришелец блокирует поток магмы, которому теперь приходится искать другой выход на поверхность.

Согласно этому хитроумному сценарию, магматический поток после такой атаки меняет путь, выталкивая снизу некий микроконтинент, имеющий базальтовую основу и тонкую гранитную поверхность. Располагаясь под такой плотной, не пропускающей тепло базальтовой заслонкой, внутренний источник тепловой энергии способствует ускоренному образованию гранита и наращиванию таким образом слоя твердой гранитной корки. Эта фантастическая картина, возможно, являлась частью процесса формирования континентов на планете. За миллиард лет вертикальной тектоники, ускоренной

падениями крупных астероидов, в океане возник бесконечный ряд вулканических островов смешанного базальто-гранитного состава. Так постепенно из моря поднималась суша. Четыре миллиарда лет назад громадные острова, хаотично разбросанные по всей планете, по-видимому, составляли весьма скромную часть ее поверхности.

Но вот появилась тектоника плит — и формирование земной коры вступило в ускоренную фазу.

Дрейфующие континенты

Открытие такого важного геологического механизма, как тектоника плит, оказало влияние на всю современную науку. Этой теории предшествовали по меньшей мере четыре века исследований, но довольно долгое время сама мысль о том, что целые континенты могут каким-то образом перемещаться по земной поверхности, была смутной и казалась ересью, а распространение и широкое признание получила лишь в результате интенсивной международной научной деятельности, приведшей к открытиям 60-х годов прошлого века. Но как только накопилось достаточно данных, естественные науки пережили один из самых революционных сдвигов в своей истории. На самом деле в течение пяти лет моего обучения в MIT, т. е. к середине 1970-х гг., все учебники по геологии пришлось полностью переписывать, поскольку незыблемый принцип вертикальной тектоники был полностью опровергнут.

Взгляд в прошлое показывает, что некоторые доводы против вертикальной тектоники давно должны были быть замечены. Несмотря на приличную высоту Скалистых гор, они являются просто карликами по сравнению с почти 9-километровым Эверестом, да и всем горным массивом Гималаев. Средняя глубина Мирового океана составляет примерно 3–4 км, тогда как глубина Марианской впадины в Тихом океане составляет более 11 км. Такие топографические контрасты просто не смогли бы существовать в изостатическом мире. Вертикальная тектоника не объясняет всего.

Некоторые намеки на роль латеральной тектоники (боковых движений) в геологической эволюции планеты можно найти в первых уточненных картах побережий Нового Света. К началу XVII в. уже стала очевидной поразительная совместимость между восточной береговой линией Американского континента и западными берегами Европы и Африки. Те же извилистые очертания, впадины и выступы, округленные контуры крайней юго-западной оконечности Африки и соответствующие им извивы побережья на востоке Южной Америки — все это указывало на некую древнюю картинку-пазл, фрагменты которой подходят друг к другу.

Было выдвинуто несколько причудливых гипотез в попытке объяснить загадочное совпадение между береговыми очертаниями континентов, разделенных Атлантическим океаном. Астроном Уильям Генри Пикеринг из Гарварда, сторонник теории Джорджа Дарвина об отпадении Луны от Земли (Луна оторвалась в виде расплавленного сгустка от быстро вращающейся Земли), утверждал, что одновременно с отрывом Луны в районе Тихого океана на противоположной стороне Земли образовалась впадина Атлантического океана. Некоторые усматривали в форме Атлантического океана промысел Божий. Возможно, берега Атлантического океана образовались в результате Всемирного потопа, который был вызван Господом несколько тысяч лет назад для сотворения огромного океана и «разделения земель».

Разрешить вопрос могли бы системные геологические изыскания, но четыре столетия назад даже слова «геология» не существовало, тем более каких бы то ни было изысканий. Горное дело и сельское хозяйство, движущие силы экономики, стоявшие за первыми геологическими съемками в конце XVIII в., были делом исключительно государственным и внутринациональным. Мало что предпринималось, чтобы вывести исследование геологических формаций за пределы политических границ, да и ресурсы отдельных стран отнюдь не с большой охотой соединялись в интересах общей работы. Золото в буквальном смысле принадлежало той земле, в которой его

находили. В таком националистическом подходе к картографии не могло найтись места планам сопоставить геологические особенности побережий, расположенных по обе стороны Атлантического океана.

Впервые попытка подробно сравнить геологические особенности по обе стороны океана была предпринята совершенно неожиданным человеком — метеорологом Альфредом Вегенером, который большую часть жизни был связан с Арктикой. (Он умер в возрасте 50 лет, участвуя в спасательной экспедиции в ледяных просторах Гренландии.) Его профессиональная деятельность в основном была посвящена исследованию погодных процессов, но главным трудом его жизни стало то, что он называл «дрейфом материков»; это был первый и явно недооцененный вклад в теорию тектоники плит. Вдохновение, результатом которого стала столь неожиданная теория в области геологии, пришло к нему во время Первой мировой войны, когда он служил лейтенантом-резервистом в германской армии. Получив ранение в шею во время бельгийского похода, Вегенер был демобилизован и получил разрешение заняться наукой.

Подобно своим предшественникам, Вегенер был поражен очевидным сходством береговых очертаний материков по обе стороны Атлантического океана, хотя ряд ученых отметали это сходство как простое совпадение. Вегенер провел обширные исследования и обнаружил, что аналогичные совпадения наблюдаются в различных местах побережья Восточной Африки, Антарктиды, Индии и Австралии. Получалось, что все материки на Земле можно было аккуратно сдвинуть в один огромный суперконтинент, который Вегенер назвал Пангеей (от греч. Πανγαῖα — *все земли*). У него нашлось несколько единомышленников, принимавших во внимание новейшие данные геологических съемок прибрежных регионов Европы, Африки и обеих Америк, в которых обобщались уточнения относительно огромной территории по обеим сторонам Атлантики. Крупнейшие горнодобывающие районы, например золотые и алмазные рудники Бразилии и Южной Африки,

оказывались единым громадным месторождением, если совместить края противоположных материков. Аналогичным образом с высокой точностью совпадали слои горных пород, содержащие остатки своеобразных ископаемых папоротников Glossopteris и вымерших рептилий Mesosaurus. Вегенер утверждал, что такие детальные геологические и палеонтологические совпадения не могли быть простой случайностью.

Впервые Вегенер опубликовал свою гипотезу дрейфа континентов в 1915 г. За этим последовали три публикации на немецком языке с новыми подробностями, в 1924 г. вышел английский перевод под названием «Происхождение материков и океанов», а также ряд других изданий. Появлялись все новые данные в поддержку гипотезы о том, что когда-то все материки представляли собой единое целое. В 1917 г. комитет палеонтологов свел в единый каталог десятки примеров очевидных совпадений между слоями, содержащими окаменелости, по обе стороны океанов — эти сведения были истолкованы как свидетельства наличия сухопутных связей между материками в древности. Геолог из Южной Африки Джеймс дю Тойт, увлеченный идеями Вегенера, получил грант от Института Карнеги для проведения исследований на восточном побережье Южной Америки. Он зафиксировал множество примеров трансатлантических совпадений: поразительное сходство минералов, горных пород и ископаемых.

Однако, несмотря на накопленные данные, свидетельствующие о совместимости материков, сообщество ученых оставалось равнодушным. Отсутствие правдоподобного объяснения механизмов движения континентов заставляло многих геологов открыто пренебрегать доводами Вегенера. Их критическое отношение к его гипотезе зиждилось на законах движения, сформулированных Ньютоном, согласно которым передвижение огромных континентальных масс невозможно без наличия колоссальной движущей силы. Пока не объявится такая сила в глобальном масштабе, дрейф материков будет рассматриваться не более серьезно, чем бредовая идея геолога-любителя. В 1923 г.

физик Гарольд Джеффрис из Кембриджа подытожил британскую точку зрения на этот вопрос: «Физические основания, которые приводит Вегенер, просто смехотворно нелепы». Американские геологи придерживались похожих взглядов. На симпозиуме в 1926 г. Роллин Чемберлен с факультета геологии Университета Чикаго жестко высказался о гипотезе континентального дрейфа: «В целом гипотеза Вегенера относится к типу легкомысленных, она слишком вольно трактует глобальные процессы, к тому же слабо связана ограничениями и в большей степени игнорирует неудобные факты, нежели другие конкурирующие теории. Чтобы поверить в теорию Вегенера, нам придется забыть все, что мы усвоили за последние 70 лет, и начать все сначала».

Однако нашлись ученые, проявившие большой интерес к открытиям Вегенера и его сторонников, и начали искать новые механизмы, объясняющие дрейф материков. Согласно одной из гипотез, Земля сжимается, возможно, из-за охлаждения или из-за обрушения наполненных газом пустот глубоко в недрах планеты, и таким образом части поверхностной коры постепенно опускаются, подобно разбитому своду. Согласно этой мало обоснованной модели, когда-то между западным побережьем Америки и восточными берегами Африки и Азии существовало обширное пространство суши. Нынешний Атлантический океан рассматривался как гигантский свод суши, рухнувший в мантию. Эту модель сжимающейся Земли опровергает простая эвклидова геометрия: обычный свод может обрушиться, но если перенести эту идею на шар, окажется, что участок суши объемом с Атлантический океан явно не может рухнуть в никуда.

Выдвигалась и противоположная гипотеза, согласно которой Земля расширяется, надувается, как аэростат, на протяжении геологического времени. В давние-предавние времена существовала только континентальная кора, которая начала трескаться и раскалываться, когда планета раздулась (одно из объяснений — воздействие глубинных раскаленных газов). Если прокрутить такую воображаемую пленку назад,

то мы увидим, что в какой-то момент все материки составляли сплошной покров шара, диаметром примерно три пятых от современного размера Земли. С 1920-х по 1960-е гг. эта гипотеза (за неимением других объяснений феномена Атлантики) поддерживалась рядом специалистов, пока ее не потеснила весьма захватывающая новая идея.

Невидимые горы

После Второй мировой войны ускоренными темпами развивался научно-технический прогресс. Две разработки в противолодочной обороне, рассекреченные и взятые на вооружение океанографами в 1950-е гг., привели к кардинальным открытиям в динамике развития Земли.

Гидролокатор, способный посредством звуковой волны определять расстояние и направление подводного объекта, изобретенный 100 лет назад, стал широко известен благодаря голливудским фильмам про подводные лодки. Вот, например, вы слышите «ПИНГ», через короткое время отвечает тише и мягче эхо — «пинг». Звуковая волна отражается от твердого корпуса подводной лодки. (Эффект воздействия на зрителя зависит от того, с чьей стороны происходит действие фильма — охотника или дичи.) «ПИНГ… пинг», «ПИНГ… пинг», «ПИНГ… пинг»: эхо откликается все чаще, после того как расположение лодки определено. Звучит напряженная музыка; пускаются торпеды.

Такая же технология может быть использована в научных исследованиях океанских глубин с целью исследования рельефа морского дна. Даже самые глубокие впадины и расщелины на дне океана доступны для проникновения звуковых волн. Уже в 70-е годы XIX в. британские ученые применяли примитивные гидролокаторы на борту корабля BMC Challenger и сообщали о возможном наличии крупного горного хребта на дне посредине Атлантического океана — поразительное открытие, которое некоторыми современными романтиками связывалось с затонувшей Атлантидой. После катастрофы «Тита-

ника» в 1912 г. примитивные эхолокаторы использовались для обнаружения айсбергов, а затем в годы Первой мировой войны они прошли быструю модернизацию в связи с появлением немецких субмарин. В 1920-х гг. гидролокаторы уже систематически применялись в научных исследованиях рельефа океанского дна, и это позволило довольно быстро определить, что в морских глубинах скрываются громадные горные массивы. Однако геологические выводы из этих наблюдений оказались незначительными, да и сами усилия океанографов были сильно ограничены Великой депрессией и призраком Второй мировой войны.

По окончании войны океанографы получили в свое распоряжение новое поколение гидролокаторов высокой чувствительности, которые позволяли не только отследить очертания морского дна, но и проникнуть в верхние слои горной породы. Общая картина дна Атлантики стала очевидной. В частности, по мере удаления от побережья континентальные шельфы постепенно опускаются все глубже на протяжении нескольких сотен километров. Затем края шельфов внезапно обрываются, переходя в абиссальную равнину, находящуюся на глубине более 3 км и протяженностью несколько тысяч километров. Эта равнина гораздо более обширная и ровная, чем что-либо подобное на суше. И разрезает океан протяженная горная гряда — Срединно-Атлантический хребет.

Эти данные совпадали с прежними открытиями, но всех поразила толщина земной коры под морским дном. До этого геологи полагали, что океаны уступают суше по толщине коры и что по мере удаления от берега океанское дно постепенно становится все тоньше. Однако они обнаружили, что вместо постепенного перехода морское дно обрывается стремительно, уходя в глубину. В отличие от десятков километров скалистой породы под материками, толщина дна океана составляет всего около 10 км: резкий переход располагается как раз там, где заканчивается континентальный шельф. Такая узкая граница между материками и океанами противоречила изостатическим моделям.

Исследователи годами бороздили океан вдоль и поперек. Каждое плавание подтверждало тот же результат. Огромная горная цепь, протяженностью более 35 тыс. км, гораздо больше всех земных гор, рассекала Атлантику точно посередине. Изгибы материкового побережья совпадали с извилистой линией гребня Срединно-Атлантического хребта. Более того, если принять во внимание резкий переход шельфа в абиссальную равнину (в отличие от сыпучего песчаного побережья), совпадение между континентами просто поражает, они совмещаются с невероятной точностью, как края разбитой фарфоровой чашки. Науке пришлось признать, что такое совмещение очертаний континентов не могло быть простой случайностью.

В ходе многочисленных плаваний по Атлантике исследователи обнаружили новые особенности. Срединно-Атлантический хребет сильно отличается от обычного горного массива. На суше в большинстве горных цепей высочайшие пики располагаются вдоль оси, но в центре Срединно-Атлантического хребта находится провал шириной около 35 км и примерно на 1,5 км глубже, чем прилегающие к нему с запада и востока вершины: такой ландшафт ныне именуется рифтовой долиной. Мало того, и сам хребет, и провал отнюдь не составляют непрерывную кривую с севера на юг. Рифтовая долина на всем своем протяжении имеет множество сдвигов на сотни километров то на восток, то на запад, по резким разломам, где кора была деформирована, придавая всему хребту изломанный, прерывистый вид. В чем же причина?

Вообще, все эти находки могли бы легко затеряться и быть похороненными под лавиной блестящих послевоенных открытий. В каком-то смысле это были всего лишь дополнительные данные. Но исследователи морского дна оказались неплохими рекламщиками. Брюс Хейзен и Мари Тарп, специалисты по морской геофизике из Геологической обсерватории им. Ламонта в Колумбийском университете, разработали новую живописную карту рельефа земной поверхности. Как на всех рельефных картах, они изобразили материковые возвышенности в разных цветах: по мере повышения горы

переходили от зеленых и желтых тонов к коричневым и, наконец, самые высокие вершины увенчивались белыми шапками. Среди всех выделялись крупнейшие горные массивы: Гималаи, Анды, Альпы. Художественное новшество Хейзена и Тарп проявилось в том, что необъятные подводные горные хребты были изображены тем же способом, но другими красками: различными оттенками синего цвета — благодаря этому приему Срединно-Атлантический хребет и другие глубоководные формы рельефа внушительно выделялись на карте планеты. Поместив Атлантику в центре своей карты, они подчеркнули идентичные линии береговых окончаний материков и глубоководного Атлантического хребта так, что сходства нельзя было не заметить. В 1960-е гг. карта Хейзена и Тарп стала едва ли не иконой. Что бы ни было причиной такого явного параллелизма, некая генетическая связь не подлежала сомнению. (Эта история с картой Брюса Хейзена — его имя произносится аналогично моему — и его прославленный вклад в науку сыграли в моей карьере немалую роль; поступив в 1966 г. в MIT, я был крайне удивлен тому, что самые титулованные преподаватели геологического факультета относились ко мне с большим уважением и норовили пожать мне руку. Вот что значит родовое имя — даже если это просто омонимическая ошибка — для научного признания.)

Расширяющееся море

Обнаружение Срединно-Атлантического хребта и открытие похожих вулканических горных массивов в восточной части Тихого и Индийского океанов вновь обратили внимание исследователей на движение материков и заставило заняться этим вопросом более активно. Вряд ли материки движутся беспричинно, как можно было предположить по данным Вегенера, и геологи занялись поисками скрытой силы, столь эффективно меняющей облик планеты.

Открытие следовало за открытием по мере поступления новых данных. В 1956 г. Хейзен вместе с руководителем лабо-

ратории сейсмологом Морисом Юингом отметил поразительную связь между положением центральной рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта и умеренными землетрясениями, охватывающими области морского дна протяженностью примерно до 50 тыс. км, по всему земному шару. Рифтовые долины и землетрясения каким-то образом связаны между собой, следовательно, подводные хребты являются подвижными, изменчивыми формами.

Скальные породы морского дна также преподнесли сюрпризы тем геологам, которые утверждали, что Срединно-Атлантический хребет представляет собой типичный горный массив, состоящий из уплотнившегося известняка, вроде Скалистых гор в Канаде. В результате обширных работ по исследованию донного грунта вдоль хребта вкупе с исследованием множества островов в Атлантике обнаружился лишь базальт, притом сравнительно позднего происхождения. Оказывается, что вместо относительно мягких осадочных пород, океанское дно почти полностью состоит из вулканического базальта. С востока на запад территория протяженностью более 4000 км представляет собой базальтовое основание.

Более того, тщательное датирование, основанное на учете постоянных периодов полураспада радиоактивных элементов, позволило обнаружить довольно простую закономерность в возрасте подводных пород. Базальт, взятый из рифтовой долины в центре Срединно-Атлантического хребта, новообразованный, его возраст меньше миллиона лет. Чем дальше от рифтовой долины брать образцы, восточнее или западнее, тем они оказываются древнее. Вблизи континентальных окраин возраст базальта составляет уже более 100 млн лет. Почему же породы в центре океана оказываются настолько моложе базальтов возле континентальных окраин? Можно сделать вывод, что Срединно-Атлантический хребет представляет собой ряд вулканов, извергающих все новые порции базальтовой коры. Но откуда взялись гораздо более древние базальты на окраинах океанов?

Ключевые данные о движении тектонических плит были получены с помощью другого инструмента подводных иссле-

дований — магнитометра. Подводные лодки времен Второй мировой войны были сделаны из богатых железом сплавов, т. е. обладали магнитными свойствами. Благодаря изобретению магнитометров самолеты-разведчики, охотясь за подводными лодками над океаном, фиксировали магнитные аномалии, вызванные присутствием вражеских субмарин. По окончании войны геофизики усовершенствовали магнитометры, придав им гораздо более высокую чувствительность к малейшим колебанием магнитных полей. Они закрепляли эти приборы позади научно-исследовательского судна так, чтобы они двигались непосредственно у поверхности морского дна.

Целью ученых был донный базальт, который обладает слабым магнитным полем благодаря миниатюрным кристаллам железосодержащего магнетита. Известно, что магнитное поле Земли год за годом слегка изменяется. По мере охлаждения базальтовой магмы кристаллы магнетита застывают, поворачиваясь в сторону магнитного полюса Земли, подобно миниатюрной игле компаса. Таким образом, базальт морского дна сохраняет ориентацию на магнитное поле Земли на момент затвердения породы. Интенсивные исследования в области палеомагнетизма позволяют отследить эти невидимые магнитные силовые поля, зафиксированные в затвердевшем базальте и других породах морского дна. (На суше такие измерения сделать труднее — первоначальные палеомагнитные сигналы сильно «пляшут» из-за происходивших в течение геологической истории складкообразования, наслоения сбросов и других деформаций континентальной коры.)

В начале 1950-х гг. океанографы протягивали магнитометры вблизи морского дна на большие расстояния поперек подводных хребтов. С помощью таких палеомагнитных съемок они надеялись получить более точную картину эволюции магнитного поля Земли. Вместо этого был выявлен причудливый рисунок магнитных полей, поразительно замысловатый, но стабильный. Ближе к рифтовым впадинам как в Атлантике, так и в Тихом океане базальт имел нормальную намагниченность, точно указывая на современный северный магнит-

ный полюс. Но буквально в нескольких километрах на восток или запад от рифтовой долины магнитный сигнал переворачивался на 180°: северный магнитный полюс оказывался почти с противоположной стороны относительно его современного расположения, т. е. там, где предположительно должен был находиться южный полюс, и наоборот. Снова и снова измерения намагниченности производились многие десятки раз в самых разных пересечениях, и всякий раз «застывшее» в горной породе магнитное поле совершало такие скачки.

Дополнительный анализ выявил три важных обстоятельства. Во-первых, противоположно намагниченные породы образуют длинные, узкие полосы, идущие с севера на юг строго параллельно хребтам и в Атлантическом, и в Тихом океанах. Там, где центральная рифтовая долина разорвана и смещена трансформными разломами, то же искривление повторяют магнитные полосы. Во-вторых, рисунок этих магнитных полос симметричен относительно оси хребта: плыви на восток или запад от центра, обнаружится одинаковая последовательность нормально и обратно намагниченных полос соответствующей ширины. И в-третьих, радиометрическое датирование этих базальтов из океанических хребтов по всему миру подтверждает, что каждая смена магнитной полярности происходила повсюду одновременно, в ограниченный и строго определенный промежуток времени. Таким образом, магнитные инверсии отражают своего рода линию жизни океанского дна.

Из этого следует два логичных, хотя и обескураживающих, вывода. Вывод первый: магнитное поле Земли очень вариабельно, оно разворачивается на 180° в среднем каждые полмиллиона лет, и происходило так по крайней мере последние 150 млн лет. Причины этого непостоянства теперь более или менее понятны. Наша планета представляет собой гигантский электромагнит; ее магнитное поле обусловлено вихревыми электрическими токами в конвектирующей, жидкой наружной области ядра. Эти потоки направляются тепловой энергией; плотная раскаленная жидкость внутренней области ядра расширяется и поднимается за ее пределы, а ее замещает более

прохладная и тяжелая жидкость, которая поступает сверху. Используя сложное компьютерное моделирование, геофизики показали, что вращение Земли вокруг собственной оси сообщает процессу конвекции сложные, хаотические искажения — движения, в результате которых магнитное поле меняется приблизительно каждые полмиллиона лет. Вращение Земли также вынуждает магнитные полюса постоянно выравниваться относительно оси вращения, но во время нестабильности ядра магнитное поле может значительно колебаться и искажаться примерно в пределах столетия.

Второй вывод заключается в том, что срединные океанские хребты образуют новые базальтовые слои коры — более 3 см в год. Старый базальт раздвигается в стороны, в восточном и западном направлениях от хребта, а их место занимает новая лава. Таким образом, системы горных хребтов на дне океанов представляют собой гигантские «ленты транспортера» движущиеся в противоположных направлениях, которые надстраивают молодое океанское дно. Новое поколение базальта в Срединно-Атлантическом хребте расширяет Атлантический океан, примерно на 5 см ежегодно, в среднем дно океана прирастает на 1,5 км за 30 тыс. лет. Если вернуться на 150 млн лет назад, то выяснится, что Атлантического океана тогда не существовало. В то время Америка, Европа и Африка были единым материком, как и предполагал Альфред Вегенер.

Одна из самых известных публикаций об этом поразительном открытии появилась в 1961 г., в «Вестнике Геологического общества Америки». Британский геофизик Рональд Мейсон и американский специалист по электронике Артур Рафф из Научно-исследовательского института океанографии Скриппса в Калифорнии в результате почти десятилетнего сотрудничества подготовили исчерпывающий обзор магнитных съемок океанского дна у Северо-Западного побережья США. Главным пунктом их публикации была подробная магнитная карта плиты Хуан де Фука, обширного тектонического плато на дне Тихого океана поблизости от берегов Орегона, Вашингтона и Британской Колумбии.

Полностью черно-белая карта Мейсона и Раффа — белые и черные зоны обозначают соответственно породы, намагниченные прямо или обратно, — показывает десятки полос, направленных примерно с севера на юг. Большие блоки океанической коры отличаются единообразием, каждый в сотни километров шириной, с симметричным расположением полос относительно центрального рифта. Однако соседние блоки смещены друг относительно друга по трансформным разломам, словно произведение кубизма. Анализ смещения вдоль одного из таких разломов, называемого Зоной разрывных нарушений Мендосино, обнаруживает заметный боковой сдвиг — около 1100 км. Чтобы так разорвать земную кору, требовались мощные внутренние силы. Обнаружив аналогичные явления у подводных хребтов по всей планете, геологи, геофизики и океанографы начали обрабатывать результаты объединенными усилиями. Сопоставление данных топографии океанского дна, сейсмологии, магнитных аномалий и датирования горных пород позволило сделать общие выводы. По всей планете земная кора создается на дне океана в области хребтов, которые представляют собой динамичные зоны вулканической активности. Темпы расширения морского дна фиксируются через устойчивые симметричные структуры магнитных полос и возраст базальта.

Поток научных публикаций подействовал на общие представления геологии, и к середине 1960-х гг. былая ересь превратилась во всеобщее убеждение: материки движутся. Атлантический океан с каждым годом расширяется вот уже более 100 млн лет.

Дело об исчезающей земной коре

В начале глобальной тектонической революции одно открытие совершалось за другим, сменялись парадигмы и возникали новые, появлялись вопросы, на которые не было ответа. Один такой безответный вопрос выделялся из всех: каким образом каждые 30 тыс. лет в срединных хребтах Атлантики, Тихого и Индийского океанов образуется полоса длиной более 45 тыс. км? Как эта новая кора вписывается в общее дно? Разве

что Земля расширяется — а именно так в 1950–1960-е гг. считала небольшая, но влиятельная группа ученых, включая Брюса Хейзена, — ведь должна же куда-то деваться старая кора.

Ответ нашли сейсмологи. Во времена холодной войны 1960-х гг. все внимание сейсмологии сосредоточилось на ядерном оружии (туда же направлялись огромные деньги). После Карибского кризиса Соединенные Штаты и Советский Союз заключили договор об ограничении ядерных испытаний, согласно которому такие испытания можно было проводить только под землей. Контроль за соблюдением договора осуществлялся посредством непрерывного сейсмического мониторинга, в котором были задействованы многочисленные (и весьма дорогостоящие) чувствительные к вибрации приборы, размещенные в разных точках планеты. В результате образовалась целая сеть из 120 сейсмологических станций, Всемирная стандартная сейсмографическая сеть (WWSSN), управляемая центральной вычислительной системой в Голдене, штат Колорадо, где сосредоточилось одно из управлений Геологической службы США. Впервые появилась возможность отслеживать точное место, глубину, магнитуду и распространение слабых землетрясений (и мощных взрывов) по всей планете.

Для исследования строения Земли это было бесценно. С помощью новейших технологий геофизики могли фиксировать тысячи дотоле не выявляемых колебаний Земли и таким образом документировать не распознаваемые прежде признаки землетрясений по всей планете. Ученые обнаружили, что почти все внезапные движения земной коры происходят вдоль узких границ сейсмической активности — в местах, подобных срединно-океанским горным хребтам. Другие землетрясения случаются поблизости от вулканов вдоль континентальных окраин — например, знаменитое «Огненное кольцо» Тихого океана. Сейсмоопасные зоны Тихоокеанского региона, такие как Филиппины, Япония, Аляска, Чили и другие, образуют единую систему.

Давно известно, что сравнительно неглубокие очаги землетрясений (на глубине нескольких километров) зарождаются непо-

далеку от береговых линий, рядом с глубоководными впадинами океанского дна, тогда как все более и более глубокие очаги, залегающие иногда на глубине более сотен километров, располагаются все дальше и дальше от берега, в глубину континента. Самые глубокие очаги землетрясений обычно появляются между активными вулканами вроде горы Св. Елены и горы Рейнир в штате Вашингтон, т. е. вулканами, расположенными вдали от побережья.

В конце 1960-х гг. новые данные, полученные с помощью Сети WWSSN, позволили уточнить характер связи между глубоководными океаническими впадинами, землетрясениями и вулканами. Характерный рисунок увеличения глубины землетрясений по мере удаления от океана вглубь суши выявил существование громадных плит океанической коры, погружающихся в мантию под континентами в так называемой зоне субдукции. Старая базальтовая кора, более холодная, а потому и более плотная, чем раскаленная мантия, буквально поглощается Землей. Погружающийся базальт цепляет прилегающие участки земной коры, загибая их вниз, в результате чего образуются глубоководные океанские впадины. При образовании каждого квадратного километра новой коры в срединно-океаническом хребте точно такое же количество старой коры исчезает в зоне субдукции, сохраняя баланс.

Словно пелена спала с глаз, и новая наука о тектонике плит оказалась в центре внимания ученых. Срединно-океанические хребты и зоны субдукции определяют границы примерно дюжины движущихся плит, каждая из которых холодна (по сравнению с нижележащей мантией), хрупка (а потому подвержена растрескиванию при землетрясениях), имеет мощность всего несколько десятков километров, зато протяженность — тысячи километров. Эти жесткие плиты просто скользят по поверхности более горячих и мягких пород мантии. Тихоокеанское огненное кольцо оконтуривает одну такую плиту, Антарктида и окружающие ее моря — другую. Североамериканская и Южноамериканская плиты, простираются на запад от Срединно-Атлантического хребта до Тихоокеанского побережья Америки, в то время как Евроазиатская плита тянется

на восток от Срединно-Атлантического хребта до Тихоокеанского побережья Восточной Азии. Африканская плита простирается от Срединно-Атлантического хребта на западе до середины Индийского океана на востоке, проявляя поразительные тектонические свойства: Африканский материк начинает распадаться по образцу формирования рифтовой долины, и линия распада обозначается цепью озер и действующих вулканов, а также высокогорьем, откуда бывают родом бегуны-рекордсмены. Когда-нибудь Африканская плита расколется пополам, а посредине образуется новый океан.

Срединно-океанические хребты порождают новый материал плит, а зоны субдукции поглощают старый, но эта модель осложняется сферической геометрией Эвклида: Земля — шар. Геометрия образования и субдукции тектонических плит в шаре предполагает, что соприкосновение одних плит с другими происходит по зубчатым линиям трансформных разломов — отсюда и сдвинутые границы полос на знаменитой магнитной карте Мейсона–Раффа, отражающей картину хребта Хуан де Фука. Беспокойный разлом Сан-Андреас, причина многих памятных калифорнийских землетрясений, представляет собой еще один такой шов. По мере того, как мощная Северо-Американская плита движется в юго-восточном направлении относительно другой массивной Тихоокеанской плиты, с каждым днем усиливается напряжение вдоль разлома, что приближает жителей Лос-Анджелеса и Сан-Франциско к очередной «большой встряске».

Но довольно о простой геометрии тектоники плит. Какие силы движут этими плитами? Что заставляет двигаться и сталкиваться огромные материки в течение сотен миллионов лет? Объяснение кроется во внутренней тепловой энергии Земли. Ее недра раскалены, а в космосе царит холод. Второе начало термодинамики, отражающее самую суть космоса, гласит, что тепло всегда переходит от более теплого к более холодному объекту — тепловая энергия должна постепенно рассеиваться, находить путь для выхода в окружающее пространство.

Вспомним три известных механизма, обеспечивающих передачу тепловой энергии. Каждый теплый объект пере-

дает свое тепло окружающей среде в виде инфракрасного излучения; тепло передается также, хотя и менее эффективно, при непосредственном контакте путем теплопроводности, а также путем конвекции, когда жидкая масса движется между горячими и холодными областями. Земля тоже подчиняется второму началу термодинамики. Но каким образом тепло может передаваться от раскаленного ядра к остывшей коре? Горные породы и магма препятствуют распространению инфракрасного излучения, а вялая проводимость ненамного более эффективна. Остается только конвекция — за счет размягченной патокообразной раскаленной мантии.

Горные породы на поверхности Земли твердые и ломкие, но глубоко в недрах перегретой скороварки, каковой является мантия, они мягкие, как масло. Миллионы лет под давлением и в условиях высоких температур камни плавятся и текут. Более разогретые и мягкие породы постепенно поднимаются к поверхности, а менее разогретые и плотные опускаются в глубину. Громадные конвективные ячейки, диаметром тысячи и глубиной сотни километров, перемешивают мантию планеты величественном круговороте, скрытом от глаз. Скорость такой планетарной перетасовки тоже впечатляет — на полный оборот конвективной ячейки может потребоваться не менее 100 млн лет.

Вначале, возможно, в течение более чем миллиарда лет, конвекция мантии под базальтовой корой могла носить хаотический, бесформенный характер. Местами расплавленный гранит неупорядоченными толчками и всплесками поднимался на поверхность, где накапливался, разрушая более холодный, плотный базальт. Отдельные плотные куски этой остывшей коры медленно опускались во внутренние области в процессе глобального теплообмена*.

---

* Основная идея автора заключается в признании элементов спрединга (разрастания первичного базальтового океанического дна) и субдукции (погружения более тяжелой океанической коры под более легкую гранитно-метаморфическую) в раннеархейское время. Поднимающиеся мантийные плюмы могли образовывать вулканические острова, типа Гавайских, хотя последние сформировались гораздо позже, начиная с меловой эпохи. — *Прим. ред.*

В течение следующего полумиллиарда лет движение мантии стало более упорядоченным. Десятки небольших конвективных ячеек, вспучивая магму и опуская вниз блоки старой коры, образовали несколько крупных циклических потоков глубиной сотни и шириной тысячи километров. Там, где такие потоки поднимались на поверхность вдоль глубоководных хребтов, они образовывали новую базальтовую кору, а старый, остывший базальт погружался в мантию под крутым углом — в зонах тектонического разлома. Так на Земле возобладал новый процесс преобразования — глобальная тектоника. В поперечном сечении наружные турбулентные слои Земли, должно быть, представлялись в виде огромных крутящихся воронок, вращение каждой из которых продолжалось не менее 100 млн лет.

Тогда, как и теперь, эволюция земной поверхности является отражением мощных процессов, происходящих в глубинах. В зонах конвекции магмы вздымались громадные базальтовые вулканы. Гигантские впадины образовывались там, где участки старой базальтовой коры погружались в глубины, искривляя и выгибая дно океана. Тектонические сдвиги ускоряли образование гранита. Когда остывшая, влажная базальтовая кора погружалась в недра Земли, она постепенно нагревалась и начинала плавиться — не полностью, но примерно на 20–30%. Эти растущие массы гранитной магмы поднимались на поверхность, образуя вереницы серых вулканических островов протяженностью сотни километров. На этой стадии началось формирование материков.

Круговорот

Гранит всплывает на поверхность, базальт опускается — вот формула происхождения материков. Магма с гранитной примесью гораздо легче порождающей ее базальтовой породы, а потому эта расплавленная масса медленно и неуклонно поднимается к поверхности и либо по пути кристаллизуется, либо извергается из вулканов, которые выбрасывают на поверх-

ность огромное количество шлаков и пепла. За миллиарды лет истории Земли бесчисленные гранитные острова образовались именно таким образом.

Тектоника плит не только породила цепи таких гранитных островов, но и собрала их в целые материки. Причина кроется в том, что гранит не поддается субдукции. Подобно пробке, он как бы плывет по плотному базальту, который постепенно опускается в мантию. Образовавшись на основе базальта, гранит так и остается на поверхности. Чем больше островов образуется в результате субдукции, тем больше увеличивается площадь гранита. Представим себе погружающуюся тектоническую плиту, усеянную непотопляемыми гранитными островами. Базальтовая плита движется, но острова остаются неподвижными. Они остаются на поверхности, образуя полосу суши как раз над зоной субдукции. Минуют десятки миллионов лет, и таких гранитных островов накапливается в этом месте все больше и больше, формируя все более обширную полосу, по мере того как расплавленный гранит поднимается к поверхности, густеет и превращается в растущий материк. Острова срастаются в протоматерики, которые, в свою очередь, срастаются в континенты, подобно тому как хондриты Солнечной системы когда-то срастались в планетезимали, а потом образовывали целые планеты.

Эпическое движение тектонических плит меняет нашу планету. Тонкая, остывшая и хрупкая земная кора трескается и смещается, словно накипь на поверхности кипящего супа. Цепи вулканов, из которых выплескиваются новые массы базальта, указывают на места восходящих конвекционных потоков. Старая часть коры поглощается в зонах субдукции, которые очерчивают те места конвекционных сот, в которых потоки погружаются. Самые мощные потрясения земной коры — крупные землетрясения, извержения вулканов — всего лишь мелочь, по сравнению с теми глобальными процессами, что происходят в недрах планеты.

Тектоника плит перевернула многие представления науки о Земле. В смутные времена вертикальной тектоники каж-

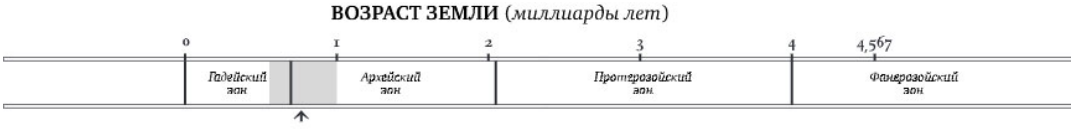
дая из геологических дисциплин рассматривалась отдельно, без связи с другими. До тектонической революции палеонтологам не о чем было говорить с океанографами; изучение вулканов имело мало общего с исследованием горных руд; геофизиков не интересовало происхождение и эволюция жизни; горные породы одной страны не имели ничего общего с горными породами другой и еще меньше — с породами глубоководных хребтов.

Наука о тектонике плит объединила разрозненные представления о Земле. Появилась возможность с высокой точностью искать по берегам расширяющегося океана местонахождения редких ископаемых организмов. Территории с угасшим вулканизмом указывают горнякам на отложения, содержащие ценнейшие руды, скрытые в соответственных зонах субдукции, давно превратившиеся в материковые горные породы. Геофизические исследования движения материков дают ключ к пониманию процессов эволюции животных и растений. Тектоника плит дает представление о Земле как о целостной планетарной системе, от коры до ядра, в микро- и макромасштабах, объединенной универсальными законами времени и пространства.

Потребовалось немало времени для накопления достаточного количества гранита, пока беспорядочная вертикальная тектоника образующихся в результате всплытия случайных мантийных потоков островов сменилась стройной сборкой континентов в результате субдукционных процессов. Но к тому времени, когда Земле исполнилось 1,5 млрд лет, конвекционные процессы в мантии — области, глубиной около 3 км, содержащей большую часть земной массы и тепловой энергии, необратимо изменили поверхность нашей планеты. В отличие от черного базальта, бесплодные гранитные массивы суши имели беловато-серый цвет, определяемый типичной смесью кварца и полевого шпата. Вообразите себя путешественником во времени — и, попав в тот древний мир трехмиллиардной давности, вы обнаружите знакомые черты. Вы окажетесь на протоматерике, лишенном всякой растительности, окру-

женные изломанными линиями гор и крутых, глубоких ущелий, отчасти напоминающими изрезанные береговые очертания в высоких арктических широтах. Вам предстоит испытать периоды бурной непогоды вперемешку с ясными солнечными днями, когда по голубому небу плывут белые облака. Вы обнаружите океан, в котором вода перенасыщена растворенными минералами, включая карбонаты кальция и магния, кристаллы, которые время от времени откладывались на базальтовой основе морского дна. Сможете полежать у прохладного голубого океана на первых белоснежных песчаных пляжах, образованных кварцевыми зернами, выветренными из серого гранита. Но вы быстро задохнулись бы в тяжелой атмосфере, содержащей большое количество азота и углекислого газа, без малейшего дуновения жизненно необходимого кислорода.

Образование материков — твердых гранитных массивов земной коры — было всего лишь интермедией в грандиозном спектакле эволюции Земли. Гранитные просторы, сформированные глубинным нагревом и частичным расплавлением приповерхностного базальта, напоминали серую коросту на первозданно-черной коже планеты. Постепенно гранитные плоты, плывущие поверх более плотного базальтового основания, утолщались и поднимались над уровнем океана, образуя корни огромных материков, — именно они, на наш антропоцентрический взгляд, и образуют земную твердь.



Глава 6

Живая Земля

Происхождение жизни

Возраст Земли: от 500 млн до 1 млрд лет

Кто бы мог подумать, что юную Землю (500 млн лет от роду) ждет столь бурное развитие. На ней буйствовали вулканы, но и на многих других планетах и даже спутниках Солнечной системы это происходило не менее бурно. Земля была покрыта океаном, но океан был и на Марсе в ранний период развития планеты, а гигантские спутники Юпитера Европа и Каллисто были покрыты обледеневшим океаном десятки километров глубиной, а значит, у них был куда больше запас влаги на поверхности. Движение тектонических плит преобразовало поверхность Земли, но в начальный период развития конвекционная тектоника, безусловно, действовала на Венере и, возможно, на Марсе.

Состав химических элементов на Земле также мало чем отличался от соседних планет. Базальты и граниты составляли основу всех каменистых планет. Кислород, кремний, алюминий, магний, кальций и железо повсюду преобладали. Земля располагала запасами углерода, водорода и серы, но и на других планетах Солнечной системы имелись те же необходимые

для жизни вещества. По всем меркам 4 млрд лет назад Земля была самой что ни на есть заурядной планетой.

Но вскоре ей предстояло превратиться в нечто выдающееся в известном нам мире. По общему признанию, она стала уникальной уже в возрасте 500 млн лет, поскольку ни одна другая планета или спутник не перенесли столь драматических потрясений; ни одна из планет не менялась так основательно и так часто. Однако эти метаморфозы касались в основном масштаба, но не сути событий. Самый активный фактор изменения планеты (что, собственно, и сделало Землю уникальной) еще не вступил в действие. Только на Земле возникла обильная, постоянная жизнь. Происхождение и эволюция биосферы и отличает Землю от всех других планет и спутников.

Что такое жизнь?

Что значит быть живым? В чем заключается это феноменальное свойство, отличающее Землю от всех остальных космических объектов? Конечно, можно попытаться описать жизнь как комплекс различных, взаимодействующих свойств — как сложную структуру, связанную со способностью двигаться, расти, адаптироваться и размножаться. Можно сослаться на такие отличительные черты, как клетки, мембраны, длинные цепи генетических молекул ДНК. Но в самом длинном перечне таких свойств обязательно найдутся исключения. Например, лишайники не движутся. Мулы не размножаются.

Более основательное определение жизни можно получить с помощью химии, поскольку все живые объекты представляют собой молекулярные системы, которым свойственны поразительно сложные и упорядоченные химические реакции. Каждая форма жизни состоит из дискретных ансамблей молекул (клеток), отделенных молекулярным барьером от внешней среды. Эти превосходные наборы химических элементов выработали два независимых способа самосохранения: метаболизм и генетику, взаимодействие которых однозначно отличает живое от неживого.

Метаболизм представляет собой разнообразный набор химических реакций, которыми все живые существа пользуются для превращения атомов и энергии окружающей среды в материал клеток. Словно миниатюрные химические заводы, клетки поглощают молекулы вещества и энергию, используя эти ресурсы для обеспечения движения, восстановления, роста и (время от времени) для размножения. И подобно химическим заводам, в отличие от стихийных лесных пожаров или ядерного синтеза первоначальной звездной материи, клетки эффективно контролируют и регулируют все эти реакции через механизм положительной и отрицательной обратной связи.

Впрочем, одного понятия о метаболизме недостаточно для представления о жизни. В отличие от неживой материи, клетки несут информацию в форме молекул ДНК и могут копировать и передавать молекулярную информацию от одного поколения к другому. Более того, эта информация способна мутировать: молекулы нередко воспроизводятся с ошибками, что обеспечивает генетические вариации. Мутации создают химические новинки, обеспечивая способность одним популяциям клеток соперничать с другими, менее удачными, бороться за выживание в условиях изменений климата или приспосабливаться при освоении других экологических ниш.

Таким образом, метаболизм и генетика могут характеризовать живую материю. При этом поразительно, как это биологи до сих пор не сумели дать более или менее универсальное определение жизни. Возможно, ближе всего подошла к такому единому определению Программа экзобиологии НАСА, поставив задачу исследовать происхождение жизни на Земле и возможность ее возникновения на других планетах. В 1994 г. НАСА на круглом столе под председательством Джеральда Джойса из научно-исследовательского института Скриппса выработала такое обтекаемое определение: «Жизнь представляет собой самоподдерживающуюся химическую систему, способную эволюционировать по Дарвину».

Джойс, лидер энтузиастов выведения жизни в лабораторных пробирках (отрасль будущего, условно именуемая синтетической биологией), достиг выдающихся результатов, совершив настоящий прорыв в данной области. Он вывел целую коллекцию тысяч разнообразных молекул, которые способны и поддерживать свое существование, и эволюционировать. Этот сложный, заключенный в стекле процесс дал результаты в виде точных копий различных молекул, с которых начинался эксперимент. Джойс обнаружил, что химическая система, которая воспроизводит до оскомины точные копии самой себя, даже если часть их способна развиваться со временем, представляет собой не что иное, как молекулярный копировальный аппарат. Естественные живые организмы, в отличие от пробирочной жизни, способны мутировать и потенциально превращаться в совершенно другие живые системы — для освоения новой окружающей среды, для выживания в чуждых климатических условиях, выполнять иные задачи, сражаться с соперниками за ресурсы. В результате Джойс пересмотрел собственное определение жизни, включив в него свойство обновления: «Жизнь — это самоподдерживающаяся химическая система, способная к обновлению и эволюции». В этой истории самым замечательным является то, что Джерри Джойс, осознав тонкости живого вещества, скромно подредактировал определение НАСА, вместо того чтобы гордо заявить о себе как о первом создателе (вспомним Франкенштейна) жизни в лабораторных условиях.

Сырье

Каким образом неживая планета Земля могла изобрести систему взаимодействия метаболизма и генетики? Большинство из нас, исследователей, занимающихся вопросами происхождения жизни, предполагают, что первая живая клетка была результатом неизбежного геохимического процесса. Земля обладала для этого всеми необходимыми исходными материалами. Океаны, атмосфера, горные породы, минералы в изо-

билии содержали важнейшие для этого элементы: углерод, кислород, водород, азот, серу и фосфор. В энергии тоже недостатка не было: солнечная радиация и внутреннее тепло Земли были наиболее надежными источниками энергии, но свой вклад могли также вносить молнии, радиоактивное излучение, падения метеоритов и многие другие источники энергии. (Как следствие, возникло не меньше теорий возникновения жизни, чем существует источников вещества и энергии.)

Однако в одном сходятся все: углерод, самый универсальный элемент Периодической таблицы, сыграл важнейшую роль. Ни один из элементов не может похвастаться возможностью создавать молекулы столь разнообразных форм со столь различными молекулярными функциями. Атомы углерода обладают уникальной способностью соединяться как с другими атомами углерода, так и со всевозможными элементами, особенно с водородом, кислородом, азотом и серой, до четырех связей одновременно. Углерод способен образовывать из атомов длинные цепочки, замкнутые кольца, сложные разветвленные структуры — и вообще практически любую форму, какую только можно вообразить. Это дает возможность строить основу белков и углеводов, жиров и масел, ДНК и РНК. Только разнообразные по форме молекулы углеродных соединений могут соответствовать двум важнейшим характеристикам жизни: способности воспроизводиться и способности эволюционировать.

Каждый кусок пищи, которую мы поглощаем, каждый глоток лекарства, каждый участок нашего тела и тел всех других живых организмов содержит углерод. Химические вещества на основе углерода распространены повсюду: в красках, клее, красителях, пластмассах и волокнах нашей одежды и обуви, в страницах и переплетах, в чернилах и, конечно, во всех видах топлива — от угля и нефти до природного газа и бензина. Далее, в главе 11 мы увидим, как возрастает наша зависимость от углеродсодержащих видов топлива и других химических веществ, последствия чего сказываются на тревожных сигналах из приповерхностных слоев планеты — изменениях, которые происходят со все возрастающей скоростью.

И все же углерод не мог сам по себе обеспечить столь поразительный скачок от геохимии к биохимии. Для порождения жизни потребовались все мощные силы планеты: вода, тепло, грозовые разряды и химическая энергия горных пород.

Шаг 1. Кирпичи и цемент

Никто не знает наверняка, как (и когда) произошел переход от безжизненного мира к живой планете, но основные принципы этого перехода постепенно выявляются в десятках лабораторий по всему миру. Биогенез происходил постепенно, шаг за шагом, постепенно усложняя химические формы развивающегося мира. Сначала должен был появиться строительный материал для молекул. Затем мелкие молекулы должны были пройти отбор, собраться и образовать основные элементы жизни: мембраны, полимеры и другие функциональные компоненты клетки. В какой-то момент молекулы начали копировать сами себя, при этом вырабатывая механизм передачи генетической информации от одного поколения к другому. Затем сработал закон естественного отбора — и возникла жизнь.

Первая, наиболее понятная ступень биогенеза заключалась в энергичном образовании молекулярных блоков: сахаров, аминокислот, липидов и прочих соединений. Эти основные вещества, образованные на основе вездесущего углерода, возникали повсюду, где энергия взаимодействовала с простейшими молекулами вроде углекислого газа и воды. Сырьевые ресурсы живого вещества образовывались там, где грозовые разряды пронзали атмосферу, где вулканическая тепловая энергия доводила до кипения океан, даже там, где ультрафиолетовое излучение облучало молекулярные скопления в глубоком космосе задолго до рождения Земли. Древние моря на Земле все более насыщались живым веществом по мере того, как проливались с небес дождем и поднимались из морских глубин биомолекулы.

Современные исследования происхождения жизни начались в 1953 г. с эксперимента по биогенезу, который и по сей день

остается самым известным событием в этой области науки. Химик Гарольд Юри, Нобелевский лауреат из Чикагского университета, вместе со своим преданным аспирантом Стэнли Миллером разработали простой и элегантный настольный стеклянный аппарат, моделирующий раннюю ступень формирования Земли. Кипящая вода имитировала гадейский океан, а смесь различных газов воссоздавала первоначальную атмосферу, в которой искровые разряды искусственно воспроизводили молнии. Через несколько дней чистейшая артезианская вода, совершенно бесцветная, окрасилась в розоватый цвет, затем приобрела бурый оттенок — за счет сложной смеси органических молекул. Прозрачное стекло покрылось липкими черными органическими осадками.

Миллер произвел химический анализ и обнаружил в этих осадках огромное количество аминокислот и других «строительных блоков» жизни. В 1953 г. он опубликовал в журнале *Science* статью с результатами эксперимента, вызвавшую настоящую сенсацию во всем мире. Вскоре ученые толпами бросились исследовать добиологическую химию. Точность смеси атмосферных газов в эксперименте Миллера–Юри подвергалась сомнению, но буквально тысячи последующих экспериментов подтвердили, что, вне всякого сомнения, уже на ранней стадии существования Земля изобиловала органическими веществами. Эксперимент 1953 г. и его последующие модификации оказались такими успешными, что многим казалось: тайна происхождения жизни в основном разгадана.

Этот первоначальный энтузиазм мог иметь негативные последствия. В эксперименте Миллера все внимание было сосредоточено исключительно в области органической химии. Экспериментаторы считали, что развитие жизни происходит в «первичном бульоне», возможно, в «маленьком теплом пруду» (о чем говорил еще Чарльз Дарвин 100 лет назад). Мало кто из исследователей 1950-х гг. учитывал сложные условия естественной геохимической среды, менявшиеся по ходу суточных циклов смены дня и ночи, жары и холода, влажности и сухости и многих других. Не принимали они во внима-

ние и масштаб естественных перепадов физических параметров, например, температуры при взаимодействии вулканической магмы с ледяным океаном или изменений солености при впадении потоков пресной воды в соленый океан. Ни один из экспериментов Миллера не включал горные породы и минералы с их разнообразием химических микро- и макроэлементов и химически активных кристаллов. Исследователи считали, что весь процесс происходил на поверхности Земли, освещенной лучами Солнца.

Влияние Миллера оказалось весьма значительным, и он со своими последователями более трех десятилетий царил в области исследования происхождения жизни. Все это сопровождалось потоком публикаций, открытием новых научных журналов, получением наград и премий. Правительственные гранты мощным потоком изливались на «последователей Миллера». Затем, в конце 1980-х гг. появилась вполне жизнеспособная альтернатива «первичному бульону», связанная с открытием глубоководных термальных зон. В этих темных глубинах, весьма далеких от освещенной Солнцем поверхности океана, насыщенные минералами жидкости вступают во взаимодействие с раскаленной вулканической корой, порождая глубоководные гейзеры. Струи горячей воды из таких подводных гейзеров взаимодействуют с холодными, глубинными океанскими водами, что сопровождается постоянным выпадением минералов в осадок (этот осадок состоит из микроскопических частиц, образующих своего рода черную «накипь»). В этих невероятно укромных глубинах живое вещество присутствует в изобилии, питаемое энергией химических реакций на границе между глубинной корой и океаном.

Битва между научными моделями происхождения жизни объясняется социологией научного мира. С одной стороны, опыт Миллера–Юри позволил получить биомолекулы, поразительно похожие на те, которые действительно лежат в основе живого вещества. Смесь аминокислот, углеводов, липидов и щелочей похожа на хорошо сбалансированную диету. Как пошутил Гарольд Юри, «если Господь не воспользовался

этим способом, он много потерял». Но истинные последователи Миллера не просто поддержали активизированный электрическими разрядами «первичный бульон»; во всех докладах и публикациях они рьяно отвергали любое инакомыслие.

Влияние этой научной клики начало приходить в упадок с момента поразительного открытия глубоководных геотермальных отложений, описанных выше, а также в связи с растущим влиянием и далекоидущими, честолюбивыми планами НАСА. Наличие черных отложений в глубоководных впадинах совпало с растущим убеждением в том, что жизнь встречается в экстремальных средах — местах, куда предыдущие поколения биологов даже не заглядывали. Теперь мы знаем, что микроорганизмы выживают в кислотных потоках, вытекающих из отходов при добыче полезных ископаемых, а также в кипящих озерах рядом с действующими вулканами. Они выживают в ледяных толщах Антарктиды и сохраняются в частицах пыли в стратосфере на высоте многих километров над поверхностью Земли. Обширные колонии микроорганизмов существуют глубоко под твердой поверхностью Земли, где живые клетки обитают в мельчайших расщелинах и полостях и подпитываются скудной химической энергией минералов, — эти формы жизни составляют не меньше половины всей биомассы Земли — столько же, сколько все растения, слоны, муравьи и люди вместе взятые. Если такие биоэкстремалы могут существовать, если значительная часть живых организмов сохраняется в глубинах, защищенных от падения астероидов и комет, — почему бы не предположить, что жизнь именно там и зародилась?

Финансирование НАСА напрямую зависит от перспективы грандиозных открытий, а потому ученые ухватились за эту идею. Если происхождение жизни ограничить только теорией, основанной на экспериментах Миллера–Юри, т. е. жизнь возникла в согретой солнечными лучами воде, тогда Земля и, возможно, Марс (на ранних стадиях его существования, примерно первые 500 млн лет) являются единственными живыми планетами в нашем ближайшем окружении. Но если жизнь способна зарождаться в темных, горячих недрах подповерхностной вул-

канической зоны, то многие небесные тела могут претендовать на внимание исследователей. Марс до сих пор сохранил глубокие гидротермальные зоны: возможно, жизнь продолжается и там. Интерес биологов вызывают и некоторые спутники Юпитера, так же как насыщенный органическими молекулами спутник Сатурна Титан, по размерам близкий Земле. Даже на некоторых крупных астероидах могут глубоко в недрах скрываться сырые, теплые области, пригодные для зарождения жизни. Если жизнь зародилась глубоко в недрах Земли, то у исследований (и соответственно — финансирования) НАСА в области экзобиологии есть будущее на многие десятилетия.

Я и мои коллеги по Институту Карнеги сравнительно недавно вступили на стезю исследований происхождения жизни. Первые, финансируемые НАСА, эксперименты нашей лаборатории начались в 1996 г. и были нацелены на изучение органического синтеза в условиях глубоководных гейзеров, где преобладают высокие температуры и давление. Подобно Миллеру, мы подвергли смеси простых газов различным энергетическим воздействиям, в нашем варианте — тепловой энергии и химически активным поверхностям минералов, какие можно встретить в глубоководных вулканических областях. Как и Миллер, мы получили аминокислоты, липиды и другие биостроительные блоки. Наши результаты были проверены исследованиями во многих других лабораториях, и подтвердилось, вне всякого сомнения, что набор органических молекул легко синтезируется в условиях «скороварки», которую и представляет собой подповерхностные области коры. Вулканические газы, содержащие углерод и азот, охотно вступают в реакцию с простыми породами и морской водой, производя при этом практически все необходимые для живого вещества «строительные блоки».

Более того, процессы синтеза управляются сравнительно спокойными реакциями восстановления и окисления (окислительно-восстановительные реакции) вроде коррозии железа или выпекания суфле. Именно эти мягкие реакции обеспечивают метаболизм живой материи, в отличие от таких бурных

процессов, как ионизирующий эффект электрического разряда или ультрафиолетового излучения. На самом деле если разряд электричества способен породить органические молекулы, то он же способен и растерзать их в клочья. Многим из нас, занятых исследованиями в этой области, представляется более логичным представить, что добиологические молекулы на Земле образовались с помощью гораздо менее затратных химических реакций, более или менее похожих на функционирование современной живой клетки.

Стэнли Миллер и его единомышленники делали все, что могли, чтобы опорочить наши выводы и сорвать наш исследовательский проект. На нас обрушился шквал критических публикаций, в которых доказывалось, что высокие температуры подводных гейзеров должны немедленно разрушить любые биомолекулы. «Гипотеза, связанная с подводными вулканами, никуда не годится, — недовольно вещал Миллер в одном из интервью 1998 г. — Я не вижу смысла даже обсуждать ее». Они основывали свои доводы на тщательно проведенных экспериментах, в ходе которых биомолекулы погибали в кипящей воде. Но этот упрощенный подход к исследованиям не учитывал всей сложности условий эпохи формирования Земли; не принимались во внимание ни запредельные температуры и состав глубинных морских вод, ни бурные потоки и цикличность вулканических выбросов, ни сложность химического состава насыщенной минералами морской воды, ни защитная поверхность скал, на которых, как стало теперь ясно, и укреплялись биомолекулы. Как бы то ни было, исследования в этой области продолжались уже не по сценарию Миллера, и теперь для многих специалистов в области биогенеза интерес представляют именно темные глубоководные зоны.

Как уже говорилось выше, все первоначальные среды, где имелись источники энергии и миниатюрные углеродсодержащие молекулы, по-видимому, внесли свой вклад в производство аминокислот, сахаров, липидов и других молекулярных «строительных блоков» жизни. В теории биогенеза нашлось место и рассекаемой электрическими разрядами и пронизан-

ной жестким излучением атмосфере, и глубоководным вулканическим гейзерам, и иным глубинным высокотемпературным средам. Биомолекулы образуются во время падения метеоритов, на опаленных лучами Солнца пылинках высоко в стратосфере и даже в молекулярных скоплениях в глубоком космосе, открытом космическому излучению. Ежегодно тонны насыщенной органикой пыли обрушиваются на поверхность Земли из космоса, и так все 4,5 млрд лет. Нам известно теперь, что строительные блоки живого вещества буквально разбросаны по всему космическому пространству.

Шаг 2. Отбор

Полвека назад самой смелой задачей науки являлся синтез базовых материалов: молекулярных «кирпичей и цемента» для строительства жизни. К началу XXI в. эта проблема была в основном решена; ученые выяснили, что Земля, должно быть, окружена разбавленным бульоном из ингредиентов для строительства жизни. Теперь интерес сместился в сторону отбора, концентрации и компоновки биочастиц в макромолекулы — в мембраны, замыкающие клетку, ферменты, содействующие ее химическим реакциям, и генетическим полимерам, которые передают информацию от поколения к поколению.

Два взаимодополняющих процесса, по-видимому, сыграли в этом важную роль. Это самосборка, при которой группа вытянутых молекул — липидов — спонтанно собирается в пучок, образуя мембраны, которые создают замкнутую оболочку первых клеток. Липиды представляют собой что-то вроде тонких цепочек, состоящих примерно из десятка атомов углерода. При определенных условиях они могут собираться в микроскопические полые шарики; продолговатые молекулы выстраиваются бок о бок, как семена в головке одуванчика. В одной из самых известных в этой области статей ее автор биохимик Дэвид Димер из Калифорнийского университета описал, как он извлек набор таких разных органических молекул из богатого углеродом Мерчисонского метеорита (скопления химических

веществ, образовавшихся в глубоком космосе задолго до появления Земли), и обнаружил, что они стремительно собираются в миниатюрные шарики, подобные клетке, словно капли масла в воде. Несколько лет назад мы с Димером обнаружили, что насыщенные углеродом молекулы, возникающие в условиях высоких температур и давления глубинных вулканических гейзеров, ведут себя подобным же образом. Ряд экспериментов позволил выяснить, что окутанные мембраной пузырьки представляют собой характерную черту добиологического мира; самосборка липидов, по-видимому, сыграла ключевую роль в возникновении жизни.

Большинство других биостроительных блоков не самоорганизуются, но способны сосредоточиваться и накапливаться на надежных, защищенных поверхностях пород и минералов в процессе, известном как матричный синтез; он представляет собой второй из механизмов отбора. Наши эксперименты, проведенные в Институте Карнеги за последние десять лет, показали, что многие из жизненно важных молекулярно-строительных блоков прилипают практически к любой естественной минеральной поверхности. Аминокислоты, сахара, компоненты ДНК и РНК адсорбируются на всех минералах, входящих в состав базальта и гранита: полевом шпате, пироксене, кварце и др. Более того, когда на одно место претендуют несколько молекул, они нередко кооперируются и сами образуют сложные поверхностные структуры, позволяя другим молекулам наслаиваться на них. Мы пришли к выводу, что, где бы первоначальный океан ни вступал в контакт с минералами, из бесформенного бульона непременно образовывались плотно собранные органические молекулы.

Здесь я должен выразить предостережение. Занимаясь исследованием происхождения жизни (возможно, подобное происходит и во многих других областях науки), ученые тяготеют к моделям, отражающим их собственную специальность. Специалист по органической химии Стэнли Миллер и его последователи рассматривали происхождение жизни исключительно сквозь призму органической химии. В отличие от них, геохимики склонны к выработке более сложных сценариев,

включая такие переменные величины, как температура, давление и химический состав горных пород. Специалисты в области формирования мембран из липидных молекул говорят о «липидном мире», а те, кто занимается молекулярной биологией и исследует ДНК и РНК, рассматривают мир как «модель РНК». Специалисты по вирусам, метаболизму, глинам или глубинной биосфере также имеют свое предвзятое мнение. Все мы таковы; мы опираемся на то, что лучше всего знаем, и рассматриваем мир через объектив своих знаний.

Я изучал минералогию, так что нетрудно угадать мои предпочтения в вопросе о происхождении жизни. Mea culpa*. Многие исследователи пришли к аналогичному заключению — на самом деле немало выдающихся биологов также тяготеют к минералам, поскольку сценарии происхождения жизни, опирающиеся только на океан и атмосферу, сталкиваются с неразрешимыми проблемами в объяснении базовых механизмов молекулярного отбора и концентрации. Твердые минералы отличаются высоким потенциалом отбора, концентрации и образования молекул. Так что минералы наверняка сыграли главную роль в происхождении жизни.

Правое и левое

Биохимические реакции — это комплекс циклических и сетевых молекулярных взаимодействий. Чтобы эти затейливые многоуровневые процессы работали, молекулы должны обладать подходящими размерами и формой. Молекулярный отбор решает задачу подбора наиболее подходящей молекулы для осуществления соответствующего биохимического действия, и матричный отбор на минеральных поверхностях в настоящее время считается наиболее правдоподобной версией происхождения жизни.

Пожалуй, самым большим препятствием на пути молекулярного синтеза является хиральность, разделение на правое

* «Моя вина» (лат.). — *Прим. ред.*

и левое, столь распространенное в мире. Многие из живых молекул образуют зеркальные пары, подобно двум нашим рукам — левой и правой. Хиральные пары молекул во многих отношениях тождественны: они обладают одинаковым химическим составом, одними и теми же температурами плавления и кипения, одинаковым цветом и плотностью, одинаковой электропроводимостью. Но «леворукие» и «праворукие» молекулы имеют разные, несовместимые формы, в чем легко убедиться на опыте, если попробовать надеть перчатку с левой руки на правую. Оказывается, жизнь невероятно разборчива: живые клетки почти всегда используют левосторонние аминокислоты и правосторонние молекулы сахара.

Хиральность имеет огромное значение. Любопытно, что искусственно созданный лимонен правосторонней формы пахнет апельсином, а в левостороннем варианте эта простейшая кольцевая молекула пахнет лимоном. Обонятельные рецепторы нашего носа чувствительны к хиральности: левосторонний и правосторонний лимонен подает в наш мозг разные сигналы. Вкусовые рецепторы менее чувствительны к хиральности сахарозы. И правосторонняя, и левосторонняя сахарозы имеют сладкий вкус, но наша пищеварительная система настроена на усвоение исключительно правосторонних сахаров. На свойстве левосторонних сахаров основано действие заменителей сахара, например, тагатозы. Трагическая история с талидомидом тоже связана с хиральностью. Правосторонняя разновидность этого лекарства облегчала утреннюю тошноту у беременных женщин, но левосторонняя модификация, которая тоже попадала к пациенткам, вызывала родовые осложнения. Теперь FDA (Управление по контролю за лекарствами и продуктами США) строго требует, чтобы лекарства обладали правильной хиральностью — это требование спасает жизни, но дополнительные расходы на производство составляют при этом около 200 млрд долларов ежегодно.

Результатом большинства экспериментов по синтезу биомолекул (включая опыты Миллера–Юри и гидротермальные эксперименты) являются левосторонние молекулы, а в естествен-

ных условиях молекулы левосторонние и правосторонние производятся примерно в одинаковой пропорции. На самом деле неживая материя безразлична к разнице между левым и правым. Но живое вещество требует точной формы: левосторонние аминокислоты и правосторонние сахарозы имеют жизненно важное значение. Молекулы противоположной направленности просто не могут функционировать. И вот наша исследовательская группа задалась вопросом: как жизнь синтезирует преимущественно левосторонние аминокислоты и правосторонние сахарозы?

Наши последние эксперименты показали, что хиральные поверхности минералов сыграли ключевую роль в отборе молекул определенной ориентации и соответственно — в происхождении самой жизни. В 2000 г. мы с коллегами обнаружили то, что тогда казалось поразительным, а теперь воспринимается как нечто обыденное: хиральные поверхности минералов встречаются повсюду в природе. Обычные минералы в составе любой породы или почвы изобилуют поверхностями, где атомы преобразуются в молекулы с определенной направленностью — либо левой, либо правой. В природе такие поверхности встречаются в равной пропорции, т. е. Земля в глобальном масштабе не отдает предпочтение ни правой, ни левой стороне. Но каждая молекула тщательно выбирает способ закручивания. Наши эксперименты показали, что определенные левосторонние молекулы обычно собираются на одном и том же наборе поверхностей кристаллов, а их зеркальное отражение, правосторонние молекулы, так же устойчиво предпочитают формироваться на другом виде минералов. Каждая поверхность, на которой отбираются и накапливаются молекулы, становится экспериментальной мини-площадкой для молекулярного отбора и синтеза.

По отдельности каждый такой естественный эксперимент взаимодействия минералов с молекулами отнюдь не порождал жизнь. Но заметим, что бесчисленные триллионы триллионов триллионов минеральных поверхностей, омываемых насыщенным органическими молекулами «бульоном», повторяли свой

маленький «эксперимент» снова и снова — и так сотни миллионов лет. Земля протестировала таким образом практически все возможные комбинации молекул в самых разных условиях. Небольшая часть таких комбинаций, проявившая способность к самосборке, или к более тесной связи с поверхностью минералов, или к большей устойчивости в условиях высоких температур и давлений, выживала и, возможно, разрасталась, может быть, продолжала эволюционировать.

У нас нет точных данных, какие именно из этих бесконечных комбинаций молекул и минералов привели к образованию чего-то похожего на жизнь, но принципы молекулярного отбора и регулирования становятся все более понятными. Биомолекулы синтезировались в огромном количестве, и некоторые из них продолжали разрастаться во все более и более крупные скопления. Наши эксперименты позволяют предположить, что большую роль играли электрические заряды. Некоторые молекулы обладали слабым положительным зарядом; другие имели слабый отрицательный заряд; третьи отличались полярностью (например, вода), т. е. одна и та же молекула обладала как положительным, так и отрицательным полюсом. У минералов также имелись либо положительные, либо отрицательные заряды. Соедините эти заряженные объекты, и они спонтанно упорядочатся: положительный заряд неуклонно притянется к отрицательному. Таким образом, всевозможные скопления молекул собирались практически во всех влажных минеральных средах нашей добиологической планеты.

Шаг 3. Воспроизведение

Скопления химических веществ, сколь бы сложными они ни были, не становятся живыми, если не могут воспроизводить себе подобных. Самый главный отличительный признак жизни заключается в воспроизводстве самой себя: некая общность молекул удваивается, затем из двух возникают четыре, и так далее в геометрической прогрессии. Величайшей загадкой в истории биогенеза остается момент, когда возникла первая

система воспроизведения молекул. Искусные опыты способны более или менее достоверно воспроизвести часть репродуктивных циклов, но мы всего лишь имитируем этот неуловимый биохимический трюк в лабораторных условиях. Как бы то ни было, в определенный момент в каком-то месте упорядоченное скопление молекул начало воспроизводить свои копии за счет других молекул (служивших для них, так сказать, пищей).

Представим себе Землю в возрасте около 500 млн лет, т. е. около 4 млрд лет назад. Она располагала «бульоном» органических молекул, триллионами триллионов химически активных минеральных поверхностей — и сотнями миллионов лет на то, чтобы что-то с этим сделать. Большинство молекулярных кластеров не представляли интереса и ничем себя не проявили. Но небольшая часть органических молекул, скопившихся на поверхности кристаллов, образовала структуры, выработавшие особо сложные функции, — может быть, более тесное прикрепление к поверхности минерала, может, способность привлекать все новые молекулы в устойчивое скопление, может, способность вызывать разрушение молекул других видов, а может, даже способность создавать копии самих себя. Природа щедро вознаграждает такие новации, и единожды возникнув, жизнь быстро распространилась, проникнув в каждый пригодный для обитания уголок планеты.

Но давайте отступим на шаг. Почему некое скопление молекул вдруг начинает воспроизводить копии самих себя? Ответ можно найти в двух основах эволюции: вариативности и избирательности. Системы развиваются по двум причинам. Во-первых, они создают огромное количество всевозможных конфигураций — это вариативность. Во-вторых, некоторые из этих конфигураций более других способны к выживанию — это избирательность. Представим себе добиологическое скопление сотен тысяч различных молекул, состоящих из углерода, водорода, кислорода и азота, возможно, с небольшими долями фосфора и серы. Добиологический синтез (а ля Стэнли Миллер) и естественные образцы (например, метеориты Дэвида Димера)

иллюстрируют вариативность. Но не все молекулы равны между собой. Некоторые из них отличались сравнительной неустойчивостью и рыхлостью — они не выдержали конкуренции. Другие склеились друг с другом, образовав бесполезную смолистую массу, и всплыли на поверхность или погрузились на дно океана, где уже не играли никакой роли. Но некоторые оказались особо устойчивыми, причем тем устойчивее, чем теснее они соединялись с другими молекулами или крепились к особо привлекательным неорганическим поверхностям. Такие молекулы выжили, когда их перестал поддерживать молекулярный бульон.

Эта добиологическая смесь совершенствовалась путем молекулярных взаимодействий. Часть таких молекулярных скоплений прочно прикреплялась к неорганическим поверхностям, что еще более усиливало их шансы на выживание. Другие молекулы, поменьше, играли роль катализаторов, укрепляя некоторые вещества за счет образования химических соединений или ускоряя разрушение других веществ за счет распада химических соединений. Молекулярный «бульон» стремительно рассеивался, но наилучшая надежность в такой среде достигалась не только за счет уничтожения конкурентов или прочности крепления на неорганической поверхности. Главным условием выживания стала способность определенных скоплений молекул воспроизводить себе подобных.

Существует три разные модели, описывающие первую самовоспроизводящуюся, квазиживую систему молекул. Простейшая модель (а потому для многих из нас наиболее привлекательная) обращается к хорошо известному циклу нескольких мелких молекул — циклу трикарбоновых кислот. Он начинается с уксусной кислоты, которая содержит всего два атома углерода. Уксусная кислота вступает в реакцию с углекислым газом (CO_2), образуя пировиноградную кислоту (с тремя атомами углерода), которая, в свою очередь, тоже взаимодействует с CO_2, образуя щавелево-уксусную кислоту с четырьмя атомами углерода. Последовательность других реакций приводит к образованию все более крупных молекул, вплоть до лимон-

ной кислоты (уже с шестью атомами углерода). Цикл становится самовоспроизводящимся, когда лимонная кислота спонтанно распадается на две более мелкие молекулы, уксусную кислоту (два атома углерода) и щавелево-уксусную кислоту (четыре атома углерода), составляющие часть молекулярного витка. Один молекулярный цикл превращается в два, два превращаются в четыре, и т. д. Более того, многие из жизненно важных строительных блоков, включая аминокислоты и сахарозы, легко синтезируются через простейшие реакции с активными молекулами лимонно-уксусного цикла. Например, стоит добавить аммиак к пировиноградной кислоте, как мы получим незаменимую аминокислоту — аланин. Каждая живая клетка на Земле включает лимонно-уксусный цикл, так что его можно считать первичным свойством — своего рода атавизмом, сохранившимся от первоначальных форм жизни. Сам по себе этот цикл не является формой жизни, но он обладает способностью воспроизводить ближайший круг молекул за счет менее плодовитых химических веществ.

Полной противоположностью этого варианта по сложности являются самовоспроизводящиеся автокаталитические наборы — модель, опробованная Стюартом Кауфманом в его новаторских исследованиях в прославленном Институте Санта-Фе. В добиологическом «бульоне» вначале плавали, по-видимому, сотни тысяч различного вида и происхождения мелкие молекулы на основе углерода. Нам уже известно, что некоторые из этих веществ являлись катализаторами реакций, порождающих новые молекулы, в то время как другие реакции ускоряли распад соседних веществ. Каталитическая система состоит из скопления молекул — возможно, тысяч молекул разного вида, действующих сообща, — которые ускоряют процесс воспроизводства самих себя, одновременно разрушая любые молекулы, не входящие в систему. Это своего рода молекулярный эквивалент выражения «богатые богатеют». Здесь, как и в случае с уксусно-лимонным циклом, молекулярная система еще не является собственно живой, но в определенном смысле способствует самовоспроизведению, будучи гораздо

более сложной по составу, чем большинство неживых химических систем.

Третий сценарий предпочитают биологи, исследующие происхождение жизни, — это РНК, модель, основанная на гипотетической молекуле РНК, способной копировать саму себя. Чтобы понять привлекательность и популярность этой модели, надо снова вернуться к предыдущим рассуждениям, вспомнить две важнейшие функции жизни: метаболизм (производство вещества) и генетику (передачу следующим поколениям информации о том, как производить вещество). Современные клетки используют похожую на лестницу молекулу ДНК для накопления и копирования информации, необходимой для создания белка, но для создания самой ДНК они используют сложные многослойные белковые молекулы. Так что же появилось раньше, ДНК или белок? Выясняется, что в обоих этих процессах центральную роль сыграл третий тип молекул — РНК.

РНК представляет собой изящный полимер — длинную молекулу-цепь, собранную из более мелких отдельных молекул (нуклеотидов), вроде нити бус или цепочки букв в предложении. Четыре такие молекулярные буквы, обозначим их как A, C, G и U, могут нанизываться в любой последовательности, как закодированное сообщение. Эти «буквы» РНК на самом деле содержат генетическую информацию (подобно ДНК). В то же время молекулы РНК способны принимать самые сложные формы, которые обладают свойством катализировать важнейшие биологические реакции (подобно белкам). Именно молекулы РНК содействуют синтезу всех белков, передавая информацию и одновременно катализируя образование белков. Таким образом, из всех живых молекул именно РНК способна «сотворить все, что угодно».

Модель мира, основанная на РНК, предполагает, что некий, пока еще до конца не изученный химический механизм произвел бесчисленное количество нитей РНК или, возможно, похожей на нее информационно насыщенной молекулы. Почти все эти разнообразные нити ничего не делали: они либо

выживали, либо постепенно распадались. Но небольшое количество отборных нитей РНК приобретали весьма полезные для себя свойства: они скручивались, обретая большую устойчивость, или крепко цеплялись за надежную неорганическую поверхность, или уничтожали соперничающие молекулы — в общем, еще один пример молекулярной конкуренции в добиологическом «бульоне».

Суть гипотезы о роли РНК в происхождении живого мира заключается в том, что одна из мириад этих нитей освоила хитрый трюк — как воспроизводить копии самой себя, т. е. превратилась в самовоспроизводящуюся молекулу. Нельзя сказать, что идея эта слишком надуманная. В конце концов, РНК во многом подобна ДНК, которая способна к самокопированию (репликации). Более того, РНК легко видоизменяется. Таким образом, первая молекула РНК, создавшая копию самой себя, пусть пока еще несовершенную, вскоре оказалась окруженной бесчисленными, хотя и слабыми, конкурентами — вариантами самой себя, часть которых, однако, быстро преуспела в искусстве репликации либо за счет экономии энергопотребления, либо в силу меняющейся окружающей среды. Такое успешное развитие молекулы РНК приблизило ее к необходимым условиям возникновения жизни: она превратилась в самоподдерживающуюся химическую систему, способную к усвоению нового и к развитию по Дарвину — иными словами, в пригодную к молекулярной эволюции.

Возможно, потребовалось много времени, чтобы возникла эта первичная, самовоспроизводящаяся молекулярная система, примитивная, но действующая, будь то в виде уксусно-лимонного цикла, системы автокатализа или репликации РНК. Но в ее распоряжении на протяжении многих миллионов лет было невообразимое число комбинаций молекул на триллионах триллионов минеральных поверхностей, занимавших более 500 млн км^2 поверхности Земли. И вот одна из этих неисчислимых комбинаций в каком-то месте в какой-то миг сработала. Она освоила механизмы репликации и эволюции. Это новшество изменило мир.

Опыты биолога Джека Шостака в Бостонской лаборатории Гарварда демонстрируют силу избирательности в молекулярной эволюции. Большинство своих экспериментов группа Шостака начинает со смеси 100 трлн различных разновидностей РНК, каждая из которых состоит из 100 нитей произвольной последовательности A, C, G и U. Громадное количество нитей РНК скручивается, принимая разнообразные формы, и сталкивается с задачей: например, плотно соединиться с молекулой другой формы. Сотрудники лаборатории Шостака выливают раствор со 100 трлн нитей РНК в мензурку с мелким стеклянным бисером, причем каждая бусинка покрыта молекулой специфической формы. Эти молекулы становятся мишенями, действуя в насыщенном растворе РНК подобно крючкам. Большинство молекул РНК на эти крючки не реагирует, поскольку их формы не соответствуют эталону. Но небольшая доля скрученных молекул РНК прицепляется к бусинам-мишеням и закрепляется на них.

Здесь-то и начинается самое интересное, когда исследователи выливают использованный раствор (вместе с почти 100 трлн непригодных нитей РНК) и извлекают те немногочисленные нити, которые в силу случайных свойств формы прикрепились к стеклянным бусинам. Применяя стандартные приемы генетической технологии, имитирующие вероятные добиологические процессы, они готовят новую партию молекул РНК (тоже 100 трлн нитей), но на сей раз все молекулы являются сырыми копиями — мутантами тех немногих нитей РНК, которые проявили активность на первом этапе. Повторный этап дает новое поколение действующих молекул РНК, при этом в новом поколении находятся вариации молекул, которые реагируют на бусин-хозяев гораздо увереннее, чем первое поколение. Некоторые «дочки» первичных молекул намного превосходят по активности своих родителей. Процесс повторяется несколько раз, и с каждым поколением новые нити РНК крепятся к бусинам все активнее и прочнее, пока не выявятся самые способные из мутантов: они наиболее энергично сцепляются с выбранными мишенями.

Весь эксперимент длится несколько дней — меньше недели требуется на то, чтобы от случайных нитей возникло поколение прочно крепящихся молекул. Но попросите этих самых блестящих в мире исследователей смоделировать действующую молекулу РНК на пустом месте, они ответят, что это практически невозможно, даже с применением современных вычислительных ресурсов. Ни одна из известных сегодня методик не может точно предсказать, какую именно свернутую форму примет молекула РНК или как она прикрепится к другим молекулам сложной формы. Не интеллектуальный расчет, а сама молекулярная эволюция на сегодня является самым эффективным методом достижения результата. (Вот где истоки суждения, что, даже если жизнь сотворил Бог, у нее хватило ума воспользоваться эволюцией.)

Взрывное развитие жизни

В добиологическом «бульоне» любое скопление молекул, обладавших малейшим полезным свойством, имело преимущество. Но все эти молекулярные войны блекнут по сравнению с преимуществом, которым обладали нити РНК, способные не только функционировать, но и создавать копии самих себя. Молекула, обладавшая свойством репликации, обеспечивала себе выживание, создавая более или менее одинаковых «дочек». Процесс репликации был неизбежно беспорядочный, поэтому некоторые из копий оказывались мутантами. Большинство мутантов просто погибали или не обретали никакого особого преимущества, но некоторые превосходили своих родителей, и за счет этого осуществлялась эволюция системы. Благодаря какой-нибудь случайной ошибке исходная молекула производила потомство, которое лучше переносило высокое давление, повышение температур или солености окружающей среды; оно могло ускорить процесс репликации, находить новые источники питания или уничтожать более слабых конкурентов. Те молекулы РНК, которые надежно укрепились на минеральной поверхности или нашли без-

опасное убежище внутри мембранной капсулы, получили еще больше преимуществ.

Не имея конкурентов, первоначальные самовоспроизводящиеся молекулы захватывали богатые питанием области в мгновение геологического ока. Может быть, это парадоксально звучит, когда мы говорим о том, что микроскопические молекулы захватывают пространство, но почему бы не вспомнить, что первой, относительно слабой самовоспроизводящейся молекуле понадобилась всего неделя, чтобы создать копию самой себя. (В отличие от этого многие современные микроорганизмы размножаются за считаные минуты.) Неделя за неделей две молекулярные нити превращались в четыре, четыре — в восемь, и т. д. При такой скорости потребовалось бы около полугода, чтобы сформировалась плотная масса, состоящая из 100 млн самовоспроизводящихся молекул, т. е. достаточно крупный объект, видимый невооруженным глазом. Еще через 20 недель масса РНК-молекул уже могла бы заполнить наперсток. Добавим еще 20 недель — и первые проявления жизни могли бы заполнить приличных размеров ванну.

Продолжающееся еженедельное удвоение дало поразительную трансформацию. Через следующие 20 недель РНК уже занимала целые километры водных просторов, либо вдоль берега, либо во внутреннем озере, либо в глубоководных областях. И уже через два года, учитывая, что каждая нить РНК еженедельно удваивается, на Земле появился уже миллион кубических километров живого вещества — достаточно, чтобы заполнить Средиземное море.

Примитивные одноклеточные организмы, которые питались химической энергией горных пород, вряд ли могли серьезно повлиять на геологию Земли — на распределение приповерхностных пород, например, или на разнообразие минеральных веществ. Живая или еще нет, 4 млрд лет назад поверхность нашей планеты оставалась бесплодной, черной или серой, климат менялся медленно, так что первые формы жизни мало что изменили в покрывавшем планету голубом океане.

Первые разрозненные микроорганизмы почти не оставили следа, поэтому трудно с уверенностью сказать, когда именно возникла жизнь. В небольшом количестве в самых древних осадочных породах, образовавшихся в мелководных условиях океанов около 3,5 млрд лет назад, содержатся достоверные ископаемые остатки микроорганизмов. В неглубоких местах колонии одноклеточных отлагали один минеральный слой за другим, образуя куполообразные каменные строматолиты от нескольких сантиметров до нескольких метров в диаметре. Многослойные одеяла из микроорганизмов (микробиальные маты) покрывают целые полосы прибрежного пространства, укрепляя и переформируя пески в приливно-отливных зонах. Через все геологические эпохи до нас даже дошло небольшое число сферических образований, насыщенных углеродом, со стенками, напоминающими клеточные, — скорее всего, следы окаменелых микроорганизмов. Однако неопровержимых свидетельств не найдено. Геохимические следы углерода и других биоэлементов, сохранившихся в претерпевших значительные изменения за почти 4 млрд лет породах, весьма занимательны сами по себе, но вряд ли послужат убедительными доводами для геологического сообщества.

Так когда же возникла жизнь? Если вы настаиваете на том, что жизнь возникла рано, что она возникает часто, на любой подходящей для этого планете или на спутнике, тогда, возможно, вы согласитесь, что уже 4,4 млрд лет назад на Земле имелась устойчивая биосфера — т. е. жизнь образовалась за первые 150 млн лет существования Земли. Для этого были все условия: океаны и атмосфера, минералы и энергия. Столкновения с гигантскими астероидами и кометами могли представлять значительную угрозу гадейским формам жизни, пожалуй, за исключением тех выносливых клеток, которые приспособились к высоким температурам и давлениям в своих защищенных убежищах — горных породах под поверхностью океанского дна. Возможно, жизнь зарождалась не единожды, а заново возникала много раз, пока Земля не вошла в более спокойный постпубертатный возраст. Если все обстояло именно так, тог-

да окаменелости возрастом 3,5 млрд лет отражают экосистему, находившуюся в процессе создания по крайней мере в течение миллиарда лет.

Если же вы полагаете, что жизнь возникает с трудом и встречается весьма редко на просторах космоса, тогда вы, скорее всего, поддержите теорию, согласно которой жизнь зародилась на Земле примерно 3,5 млрд лет назад. Может, жизнь вообще настолько маловероятна, что для ее возникновения на Земле потребовался целый миллиард лет минерало-молекулярного взаимодействия на территории сотни миллионов кубических километров океанической коры. Возможно, эти редкие, драгоценные окаменелости, сохранившиеся со времен архейского эона, и знаменуют собой истинное начало биосферы.

Живая Земля

Когда бы ни возникла первая жизнь, 4,4 млрд или позднее 3,8 млрд лет назад, факт остается фактом: она мало изменила древний облик планеты. Те первые микроорганизмы просто усвоили химические уловки, уже знакомые Земле. С первых дней существования нашей планеты на ее твердой поверхности или в приповерхностных областях происходят химические реакции. Суть их сводится к распределению электронов: атомы в мантии в среднем располагают гораздо большим количеством электронов, способных вступать в химические реакции, чем атомы в земной коре. Мантия более «плотная», тогда как кора более «окисленная», выражаясь химическим жаргоном. Когда плотные химические вещества встречаются с окисленными — например, когда плотная магма и газы из мантии вырываются на окисленную поверхность во время извержения вулкана, они часто испытывают химические реакции с высвобождением энергии. Во время этого процесса электроны первых переходят ко вторым.

Ржавчина, возникающая от взаимодействия железа с кислородом, — типичный пример такой реакции. Твердое железо переполнено электронами — там столько электронов, что часть

из них свободно проходит сквозь металл и проводит электричество. Таким образом, железо является донором электронов. Газообразный кислород, напротив, испытывает такую недостачу электронов, что два атома кислорода должны соединяться, чтобы образовать молекулу O_2, в которой атомы делятся своим скудным запасом электронов, словно пайком на необитаемом острове. Кислород является идеальным акцептором электронов. Когда металлическое железо встречает молекулы кислорода, происходит стремительный обмен электронами. В результате этого обмена возникает новое химическое соединение, окись железа, сопровождаемое небольшим выбросом энергии.

Помимо железа электронами насыщены и другие металлы: никель, марганец, медь — и они тоже подвергаются окислению. Окисляются и многие из простейших углеродистых молекул, возникших в результате молекулярного синтеза в добиологических процессах, включая метан (природный газ), пропан и бутан. Газообразный кислород редко встречался в первичной атмосфере Земли, но его активно заменяли другие охотники за электронами, включая сульфаты (SO_4), нитраты (NO_3), карбонаты (CO_3) и фосфаты (PO_4).

До возникновения жизни окислительно-восстановительные реакции происходили сравнительно неторопливо. Но первые микроорганизмы быстро научились перемещать электроны ускоренными темпами. Живые клетки становились посредниками в передаче электронов во многих местах: в прибрежных водах, на мелководье, в осадочных породах на дне океанов. Колонии микроорганизмов обеспечивали себе пропитание за счет ускорения темпов реакций, используя высвобождавшуюся при этом энергию для роста и размножения. Окись железа появилась на Земле с самого начала, но возникшие позднее микроорганизмы ускорили ее образование. Играя свою роль в процессах обмена электронами, жизнь стала понемногу изменять структуру земной поверхности. Микроорганизмы использовали обильный источник энергии, доступной в виде железа, растворенного в гадейском и архейском океанах; они окисляли железо, образуя ржаво-красный гематит — эта химическая

реакция высвобождает достаточно энергии, чтобы обеспечить целую экосистему. Массивы осадочных пород железа, обнаруженные в Австралии, Южной Африке и других районах, можно считать остатками пиршества микроорганизмов, длившегося десятки миллионов лет. Вот так и началась удивительная совместная эволюция геосферы и биосферы.

Эволюция путем естественного отбора продолжала развивать все эти процессы. Разновидности микроорганизмов, научившиеся использовать железо в качестве источника питания, приспосабливаться к экстремальным условиям или пользоваться окислительно-восстановительными реакциями, получали явное преимущество в борьбе за выживание. Мутирующие популяции микроорганизмов гораздо эффективнее, чем неживая природа, изобретали новые катализаторы, способствующие выработке энергии. В результате повсюду появлялись небольшие холмики известняка, небольшие месторождения окислов железа, а также постепенное увеличение количества приповерхностного углерода, серы, азота и фосфора. И все же эти ранние формы жизни в основном имитировали химические процессы, которые уже происходили (хотя и гораздо медленнее) до них в неживой природе.

Свет

Большинство исследователей происхождения жизни допускают, что ранние формы жизни существовали только за счет химической энергии горных пород, являющейся, безусловно, одним из обильных источников энергии. Однако в случае существования только за счет этой энергии пространство, где могла бы процветать жизнь, было бы существенно ограничено. В какой-то момент некоторые виды микроорганизмов изменили своей роли посредников в химических реакциях, столь важных для их среды обитания. Они научились усваивать солнечное излучение, которое оказалось изобильным и дешевым источником энергии для любого обитателя земной поверхности в любой точке планеты.

Главная функция фотосинтеза заключается в использовании солнечного света для производства биомолекул из такого распространенного сырья, как углекислый газ, азот и вода. Что касается подходящего химического строительного материала, все важнейшие строительные блоки жизни — аминокислоты, сахарозы, липиды, компоненты ДНК и РНК — могут создаваться из атмосферных газов и солнечного излучения. В отличие от современных зеленых водорослей первые микроорганизмы, владеющие фотосинтезом, не производили кислород. Современные аналоги тех примитивных существ способны образовывать буровато-красноватую пену в застойных водоемах. Некоторые биологи даже предполагают, что громадные дрейфующие плоты занятых фотосинтезом микроорганизмов искажали голубой цвет архейского океана, покрывая его некрасивыми буро-багровыми пятнами.

Как бы мы могли это узнать? Такие микроорганизмы не имеют твердых компонентов, которые способны были бы сохраниться в виде окаменелостей; дрейфующие «слоеные пироги» водорослей не оставляют явных следов в осадочных толщах. И все же можно найти свидетельства существования древнейших светолюбивых микроорганизмов. Клетки, способные к фотосинтезу (сине-зеленые водоросли), строятся на основе гопаноидов, особых молекул, состоящих из пяти смыкающихся углеродных звеньев (по конфигурации напоминающих столь печально известные в спорте стероиды). После того как микроорганизмы погибают и разлагаются, их многокольцевые гопаноиды могут сохраняться миллиарды лет в мелкозернистых океанических осадочных породах. Чтобы исследовать остатки этих гопаноидов, отделив их от массы основной породы, требуется тщательная химическая обработка образцов. Предварительное описание должно включать всякие мудреные предположения о возможных источниках примесей, древних и современных. Палеонтологи встречают всякое сообщение о молекулах, сохранившихся за многие миллиарды лет, с известной настороженностью, если не сказать с открытым скептицизмом. Как бы то ни было, химические следы суще-

ствуют — и, может быть, это единственное окно, позволяющее взглянуть на древнюю разреженную биосферу (подробнее об этом см. главу 7).

К миллиардному дню рождения нашей планеты жизнь обеспечила себе прочный, хотя и не вполне объяснимый, плацдарм на ее поверхности. В течение следующего миллиарда лет микроскопические формы жизни слегка меняли приповерхностную среду — вначале за счет ускорения окислительно-восстановительных реакций, а затем с помощью фотосинтеза. Насколько можно судить, даже в возрасте 2 млрд лет Земля не имела сколь-нибудь существенных, вызванных наличием жизни минералогических изменений на поверхности или вблизи нее. Живые клетки производили больше окислов железа, больше известняка, больше сульфатов и фосфатов, чем неживая природа. Они формировали слоистые залежи железных руд на дне океана и сооружали защитные каменистые холмы в прибрежных водах — все эти явления задолго до основного развития жизни существовали на Земле, а также на других планетах и спутниках Солнечной системы.

Но Земля со своими примитивными популяциями клеток подготовилась к наиболее значительной трансформации в своей истории. В течение 1,5 млрд лет микроорганизмы, занятые фотосинтезом, освоили новый химический фокус — стали «выдыхать» крайне активный, агрессивный газ под названием кислород.

Глава 7

Красная Земля

Фотосинтез и Великое кислородное событие

Возраст Земли: от 1,0 до 2,7 млрд лет

Если вернуться к сегодняшним временам, становится очевидным тот факт, что жизнь необратимо изменила приповерхностную среду Земли, особенно океаны и атмосферу, но горные породы и минералы тоже подверглись трансформации. Потребовалось больше миллиарда лет после появления первой живой клетки, чтобы началось преобразование планеты. За это время новые разновидности микроорганизмов успели создать бурую или красноватую пену в некоторых прибрежных зонах. Могли уже появиться к этому времени и пятна зеленоватой слизи у берегов экватора и в мелких внутренних водоемах — благодаря особо изобретательным клеткам, использующим все новые способы поглощения солнечной энергии. Но материки по-прежнему оставались бесплодными: никакие растения не украшали каменистый ландшафт, никакие животные еще не появились, чтобы питаться этими растениями. Мы бы незамедлительно погибли мучительной смертью в этом лишенном кислорода мире.

Поверхность планеты ко времени геологического полудня изменила свой тускло-серый цвет на кирпично-красный в про-

цессе развития окислительно-восстановительного фотосинтеза и медленного формирования окисляющей атмосферы. Трудно утверждать наверняка, насколько быстро липкая зеленая тина осуществила это преобразование, называемое Великим кислородным событием. Мы можем в лучшем случае гадать об этом по едва заметным изменениям горных пород, которые свидетельствуют о всплеске фотосинтеза вскоре после достижения Землей возраста 2 млрд лет, т. е. 2,5 млрд лет назад. После такого скромного начала события развивались стремительно: ко времени 2,2 млрд лет назад объем кислорода в атмосфере увеличился с нуля до более 1% от современного уровня, навсегда при этом изменив поверхность Земли.

Загадочная история первоначального насыщения кислородом только начинает привлекать внимание науки, по мере того как открываются все новые данные и свидетельства, которые можно всерьез рассматривать. За последние полстолетия исследование палеоатмосферы сопровождалось множеством различных, порой диаметрально противоположных моделей, но научный подход позволяет отсеивать все несостоятельные и ложные идеи. У нас нет пока полного представления об этом процессе, но мы гораздо ближе подошли к истине, и начинает вырисовываться захватывающая дух (в полном смысле слов) картина.

Свидетельство горных пород

Доказательства существования Великого кислородного события основываются на большом количестве исследований горных пород и минералов, возраст которых охватывает продолжительный период земной истории — примерно от 3,5 до 2 млрд лет. С одной стороны, многие горные породы старше 2,5 млрд лет содержат минералы, которые легко разрушаются от коррозийного воздействия кислорода, что свидетельствует об отсутствии кислорода в окружающей среде в предшествующий этому времени период. Геологи находят невыветренную и округлую гальку пирита (сульфид железа, известный также под име-

нем «золото дураков») и уранинита (самый распространенный из урановых минералов) в древних руслах — местах, где такие минералы в наше время быстро подверглись бы коррозии и разрушению в условиях насыщенной кислородом среды. Древние слои песка тоже отличаются особым химическим составом — необычным избытком таких избегающих контакта с кислородом веществ, как церий, тогда как веществ вроде железа в них поразительно мало по сравнению с современными почвами. Эти химические особенности явно указывают на отсутствие кислорода в той атмосфере.

В противоположность им породы моложе 2,5 млрд лет содержат много однозначных признаков наличия кислорода. В период между 2,5 и 1,8 млрд лет появилось поразительно много массивных залежей оксидов железа, именуемых полосчатыми железистыми формациями. Эти характерные плотные скопления чередующихся слоев черного и красного цвета содержат около 90% мировых запасов железной руды. В это же время внезапно появились окислы марганца, также в виде многослойных залежей, составляющих большинство основных мировых ресурсов марганцевых руд. В этот же период среди горных пород появились сотни новых минералов — окисленные руды меди, никеля, урана и других пород, — и все это впервые после Великого кислородного события. Однако несмотря на все эти многочисленные минералогические данные, многие специалисты сомневаются, что Великое кислородное событие было таким уж великим на самом деле. Может быть, в атмосфере просто медленно и неуклонно накапливался кислород. Может, свидетельства пятнистых, выветренных камней просто вводят нас в заблуждение.

Явная улика против Великого кислородного события пришла из неожиданного источника — недавно полученные данные по изотопам такого простейшего элемента, как сера. Девяностые годы прошлого века ознаменовались ростом разрешающей способности и чувствительности масс-спектрометров, рабочих лошадок и главных инструментов анализа изотопов. Новое поколение масс-спектрометров позволило ученым ана-

лизировать все более и более мелкие образцы, даже микроскопические зерна минералов или отдельные живые клетки с все более высокой точностью. Одним из самых увлекательных объектов для исследования оказалось такое простое вещество, как сера, поскольку в природе встречается четыре устойчивых изотопа серы: сера-32, сера-33, сера-34 и сера-36. В ядре всех этих изотопов содержится заданное число протонов — 16, а количество нейтронов колеблется от 16 до 20.

Распределение изотопов обычно определяется массой и вполне предсказуемо. Все атомы колеблются, но чем легче изотоп, тем быстрее колебания. Поэтому во всех химических реакциях легкие изотопы вовлекаются активнее, чем тяжелые. Этот селективный процесс носит название «фракционирование изотопов» и происходит всякий раз, когда скопление атомов серы вступает в химическую реакцию, идет ли речь о твердой породе или о живой клетке. Изотоп серы-32 обычно фракционирует больше, чем изотопы массой 34 или 36. Более того, фракционирование обычно соотносимо с массой изотопов: фракционирование серы-36 в серу-32 всегда вдвое превышает фракционирование серы-34 в серу-32. Это физическое явление соответствует непосредственно законам Ньютона: сила, приложенная к массе, придает ей ускорение. Объекты меньшей массы получают большее ускорение, поэтому под воздействием определенной силы сера-32 колеблется быстрее, чем сера-34, которая, в свою очередь, колеблется быстрее, чем сера-36.

Десять лет назад геохимик Джеймс Фаркуар из Университета Калифорнии, работая на живописном побережье Сан-Диего, выявил основательные и неожиданные изменения в распределении изотопов серы в породах, возраст которых превышал 2,4 млрд лет. Более молодые породы и минералы почти всегда демонстрируют ожидаемую зависимость от массы; распределение изотопов серы почти полностью зависит от соотношения их масс. Но Фаркуар с коллегами обнаружил кардинально иное поведение изотопов серы в породах старше 2,4 млрд лет — в некоторых образцах отклонение составляло несколько

десятых процента (для этого явления очень большая цифра). Что могло вызвать такое нарушение незыблемых законов Ньютона?

Сообразительные теоретики, поддержанные экспериментальными данными, тут же выдвинули решение, основанное на тонкостях квантовой механики. Под воздействием ультрафиолетового излучения поведение изотопов может отклоняться от идеальной механики Ньютона. Оказывается, изотопы с нечетным массовым числом, например сера-33, могут выборочно подвергаться ультрафиолетовому излучению. Если молекула сернистого ангидрида или сероводорода случайно содержит изотоп серы-33 и сталкивается с ультрафиолетовым лучом (скорее всего, в верхних слоях атмосферы), она может реагировать очень активно. Изотоп серы-33 в таком случае проявляет «независимое от массы фракционирование», что изменяет изотопное отношение.

Но чем вызвано такое внезапное изменение на Земле 2,4 млрд лет назад? Ответ прост: ультрафиолетовые лучи способны поглощать озон, молекулу, состоящую из трех атомов кислорода, которой СМИ уделяют столько внимания в последние десятилетия. В верхних слоях современной атмосферы озон создает естественный барьер на пути смертельно опасного ультрафиолетового излучения Солнца. Проведенные за последние два десятилетия замеры показывают, что этот верхний слой озона существенно истончился, по-видимому, из-за разрушительных реакций, вызванных такими продуктами промышленного производства, как хлорфторуглероды. (В качестве показательного примера можно привести фреон, некогда применявшийся в кондиционерах.) Озоновые дыры пропускают большое количество канцерогенных ультрафиолетовых лучей. Запрет на производство хлорфторуглеродов как будто способствует быстрому восстановлению озонового слоя.

До появления в атмосфере газообразного кислорода и последующего образования озонового слоя, блокирующего солнечную радиацию, в верхних слоях атмосферы сернистые соединения подвергались безостановочному воздействию ультрафио-

летового излучения. В таких суровых условиях соединения, содержащие изотопы серы-33, испытывали независимое от массы фракционирование. После Великого кислородного события кислород в верхних слоях атмосферы вступил в реакцию с некоторыми из таких соединений и почти вытеснил эти нечетные изотопы.

Все лаборатории мира проверяли и перепроверяли находки Фаркуара, и большинство специалистов согласились с гипотезой Великого кислородного события. Если только ученые не обнаружат вместо озона какой-нибудь другой способ защиты от ультрафиолетового излучения, можно считать, что данные об изотопах серы служат точкой отсчета для начала кислородной революции примерно 2,4 млрд лет назад.

Создание кислорода

Откуда взялся кислород? В современной биологии любая вводная лекция начинается с фотосинтеза — удивительной способности растений обеспечивать рост за счет поглощения воды, углекислого газа и солнечного света, производя при этом кислород в качестве побочного продукта. Мы теперь считаем естественным, что растения играют центральную роль в превращении нашей планеты в обитаемый мир, но когда-то открытие фотосинтеза стало одним из крупнейших достижений науки. И подобно многим важнейшим открытиям, это происходило по частям.

Сначала обнаружилась роль воды. Механизм роста растений оставался загадкой для ученых XVII в., но существовало предположение, что для развития растительных тканей необходимы почвы, богатые минералами, а значит, именно за счет усвоения минеральных веществ и осуществляется рост растений. Фламандский врач Ян Баптист ван Гельмонт (1579–1644) проверил это предположение экспериментальным путем в 40-х гг. XVII в. Вот что он пишет:

> «Я взял глиняный горшок, положил в него 90 кг просушенной в топке земли и полил все это дождевой водой, поса-

див туда ивовую ветвь весом 2,3 кг; через 5 лет из ветви выросло дерево весом 77 кг. Я поливал этот горшок дождевой или дистиллированной водой (всегда, когда это требовалось)… В конце я снова просушил землю, заполнявшую горшок, и она по-прежнему весила 90 кг, не доставало лишь 57 г. Таким образом, 77 кг древесины, коры и корней выросли только за счет воды».

Открытие ван Гельмонта стало большим шагом вперед, хотя, как мы знаем теперь, вода составляла только часть условий роста.

Столетие спустя английский священник и натуралист Стивен Хейлз впервые предположил, что растения используют для роста не только воду, но и какие-то компоненты воздуха, например, углекислого газа из атмосферы. Теперь-то мы знаем, что вода в почве и углекислый газ в воздухе составляют важнейшие ингредиенты для роста организмов, живущих за счет фотосинтеза. (По иронии судьбы, именно ван Гельмонт открыл углекислый газ, но не осознал его роли в росте растений.)

При всем том роль солнечного света оставалась загадкой, и потребовалось еще 300 лет, чтобы разгадать ее. Прогресс в ядерной физике открыл новые возможности, когда последнее поколение ускорителей (циклотронов) предоставило постоянный источник высокорадиоактивных изотопов углерода-11 — чувствительного зонда биологических реакций. В конце 30-х гг. XX в. Сэмюель Рубен и Мартин Камен в Беркли использовали для отслеживания взаимодействия растения с углекислым газом «метку» в виде углерода-11. Они использовали этот индикатор радиоактивности, чтобы проследить путь углекислого газа в тканях растения, хотя условия эксперимента затруднял короткий период полураспада углерода-11 — всего лишь 21 минута.

В 1940 г. Рубен и Камен открыли новый способ получения углерода-14, гораздо более удобного изотопа-индикатора с медленным периодом полураспада 5730 лет, что обусловило революционный переворот в биофизических исследованиях

и привело к ясному пониманию того, как растения используют воду, углекислый газ и солнечный свет. Если вкратце, то умный (и очень древний) белок оксигеназа — химическое вещество, обнаруженное в определенном типе сине-зеленых водорослей, предположительно существовавших 3 млрд лет с лишним назад — концентрирует углекислый газ и воду, обеспечивая монтаж этих сырьевых компонентов в биостроительные блоки. В процессе реакции фотосинтеза, которая производит кислород, которым мы дышим, водоросли и растения поглощают шесть молекул углекислого газа и шесть молекул воды, чтобы создать одну молекулу глюкозы и в качестве побочного продукта шесть молекул кислорода. Это химическое преобразование представляет собой еще одно воплощение нашей старой знакомой — окислительно-восстановительной реакции (подобной коррозии металла). В этой реакции атомы углерода в составе углекислого газа присоединяют электроны и таким образом восстанавливаются, а вода или другой поставщик электронов окисляется. Энергию ускорения, заставляющую электроны двигаться, фотосинтез получает от солнечных лучей.

Эта реакция может показаться предельно простой — углекислый газ вкупе с водой (или любым другим поставщиком электронов) производит сахарозу и другие биомолекулы, но на самом деле подробности фотосинтеза весьма сложны и все еще не изучены до конца. Например, микроорганизмы выработали несколько способов потребления солнечного света и других источников энергии. Большая часть растений, производящих кислород, используют ярко-зеленый пигмент хлорофилл, который поглощает свет в красно-фиолетовой части спектра. Но на протяжении земной истории многие клетки применяли другие способы фотосинтеза, без образования кислорода. Другие светофильтрующие пигменты образовались в красных и бурых водорослях, пурпурных бактериях, поразительной красоты диатомеях и лишайниках самых разных оттенков. Некоторые изобретательные микроорганизмы применяли в реакциях фотосинтеза инфракрасное излучение — абсолютно невидимая для человеческого глаза

часть спектра, однако воспринимаемая кожными сенсорами как тепловая энергия.

Сложные варианты фотосинтеза стали предметом исследования для биохимика Роберта Бланкеншипа, который одновременно заведует двумя кафедрами, химии и биологии, в Университете Вашингтона в Сент-Луисе. Бланкеншип с коллегами, в том числе бывшими сотрудниками влиятельной команды астробиологов из Университета штата Аризоны, исследует признаки ранних форм жизни на Земле и других планетах. В их намерения входит изучить различные варианты фотосинтеза на примере всевозможных разновидностей живых микроорганизмов — пурпурных, бурых, желтых и зеленых, выделяя в их геномах сходство и различие. Они получают данные о сложнейших аспектах фотосинтеза: о различных фотосинтетических пигментах; о точном чередовании молекул белка, при котором электроны передаются от одной молекулы к другой; о многообразных способах использования полученных электронов для строительства блоков живой клетки; о бесчисленном количестве «антенных устройств». (Что примечательно, клетки вырабатывают специальные группы молекул, которые действуют в качестве миниатюрных светоуловителей.)

Бланкеншип считает, что жизнь изобрела невероятное разнообразие приемов фотосинтеза. Похоже, что жизнь пользуется любым доступным источником энергии. Микроорганизмы вырабатывают один за другим новые способы улавливания света, необходимого для роста и размножения, — по меньшей мере пять различных таких способов уходят корнями в древнейшую историю Земли. Многие аспекты этой истории неизвестны, но самые древние и примитивные химические реакции, датируемые 3,5 млрд лет назад, совершенно очевидно, не вырабатывали кислород. Прародители тех первичных клеток дошли до нашего времени и подтверждают, что самые древние организмы были анаэробными, т. е. не только не требовали кислорода, но и вообще не переносили его.

Исследования Бланкеншипа и его сотрудников помимо того, что они выявляют многообразные химические страте-

гии, еще и указывают на то, что микроорганизмы имеют тенденцию менять и перестраивать гены, ответственные за поглощение света, захватывая фотосинтетические технологии своих соперников, т. е. занимаясь своего рода промышленным шпионажем. На самом деле современная техника фотосинтеза, используемая практически всеми растениями, представляет собой комбинацию двух примитивных схем (прозаично именуемых Фотосистема I и Фотосистема II). Таким образом, современные организмы способны комбинировать биосинтетические реакции, поглощая и используя солнечный свет гораздо эффективнее, чем это происходило на ранних стадиях развития жизни на Земле.

Больше кислорода

Даже без фотосинтеза поверхность Земли неторопливо подвергалась окислению вследствие медленной утечки молекул водорода в космическое пространство. В верхних слоях атмосферы молекулы воды подвергаются разрушительному воздействию ультрафиолетовой радиации и космических лучей, вызывающие распад воды на водород и кислород. Атомы воды превращаются в более простые молекулы, в основном H_2 и O_2, а также небольшое количество озона O_3. Полученные в результате распада легкие и подвижные молекулы водорода H_2, в отличие от громоздких и тяжелых молекул кислорода O_2 и O_3, способны преодолеть земное притяжение и улететь в беспредельные просторы космоса. На протяжении истории Земли какое-то количество водорода таким путем покинуло планету, оставив после себя постепенно накапливающийся избыток кислорода. Этот процесс продолжается и сегодня: ежегодно Земля теряет количество водорода в объеме нескольких плавательных бассейнов олимпийского размера. В результате того же процесса Марс, который меньше Земли по массе и силе гравитации и неспособен удерживать водород, лишился большей части воды. За 4,5 млрд лет большая часть приповерхностного водорода улетучилась с Марса в космос, а железо, близкое к поверхно-

сти, подверглось коррозии, что и придало планете характерный красный цвет. Но даже при этом общее количество кислорода в тонком слое атмосферы Марса невелико: если собрать его на поверхности, слой жидкого кислорода составит меньше одной тысячной доли сантиметра.

При увеличении количества кислорода с одновременной потерей водорода поверхность Земли так же приобрела бы ржаво-красный цвет за много миллиардов лет, но вряд ли оно сыграло бы важную роль в формировании окружающей среды на ранней стадии существования планеты. По самым точным оценкам, до Великого кислородного события в атмосфере Земли приходилась менее одной молекулы кислорода на триллион. (В наши дни соотношение один к пяти.) Этот незначительный запас кислорода еще в момент появления был бы мгновенно поглощен на поверхности планеты громадным количеством жаждавших окисления атомов железа в океанах и почве. Даже если бы на Земле не появилась жизнь, наиболее устойчивые области материков украсились бы красноватым оттенком, но этот окисленный слой был бы всего лишь косметическим макияжем.

До эпохи фотосинтеза жизнь, возможно, тоже внесла свой вклад в виде небольшой доли кислорода. На самом деле живые клетки освоили по крайней мере четыре разных способа производства кислорода из окружающей среды. Сегодня кислородный фотосинтез играет главную роль, но в древние времена свою скромную долю внесли и другие биохимические процессы.

Жизнь извлекает энергию из окружающей среды любым доступным ей способом. Простейшим способом получения энергии, сопровождаемым выделением кислорода, является захват богатой кислородом и химически активной молекулы. Именно так некоторые микроорганизмы научились использовать молекулы пероксида (H_2O_2, образованные в результате различных реакций в верхних слоях атмосферы) для того, чтобы производить O_2 плюс энергия. Правда, этот вид молекул не был широко распространен в докислородную эпоху,

и вряд ли эти разновидности микроорганизмов могли существенно изменить древний мир планеты.

В Голландии группа микробиологов не так давно представила доклад о более продуктивном способе производства кислорода: они открыли новый вид микроорганизмов, которые получают энергию за счет расщепления оксидов азота. В ранней истории Земли такие оксиды возникали в небольшом количестве при взаимодействии газообразного азота с минералами — например, во время грозовых разрядов. В современную эпоху благодаря распространению и использованию азотных удобрений многие реки, озера и устья рек сильно загрязняются разными видами азотных оксидов, что способствует размножению и процветанию микроорганизмов. Недавно была обнаружена способность микроорганизмов расщеплять оксиды азота на азот и кислород, а затем использовать кислород для «сжигания» природного газа, т. е. метана, получая таким образом энергию. Эта химическая стратегия может оказаться весьма полезной на бедных кислородом планетах вроде Марса.

Окаменелости свидетельствуют

Из всех механизмов производства кислорода фотосинтез является безусловным победителем, но как давно в истории Земли начался фотосинтез и производство кислорода? Для палеонтологов, тщательно исследующих фрагментарные остатки древнейших форм живой природы, более наглядна связь между прошлым и настоящим живых организмов, чем для представителей других наук. Поэтому неудивительно, что именно палеонтологи одними из первых обнаружили свидетельства окисления Земли возрастом более 2 млрд лет. В поисках ранних следов фотосинтеза охотники за окаменелостями, естественно, обратились к древнейшим горным породам Земли.

Ископаемые свидетельства древних клеток в лучшем случае разрознены. Бесценные и малочисленные сохранившиеся следы микроорганизмов в течение миллиардов лет подвергались погребению, разогреву, сдавливанию и химическим воздействиям.

То, что сохранилось, находится в переработанном и раздробленном состоянии, часто в таком виде, который требует известной доли воображения, чтобы усмотреть в нем биологическую природу. Скопления окаменелых микроорганизмов нередко выглядят как россыпь миниатюрных черных пятнышек, поэтому неудивительно, что всякое сообщение о микроорганизмах возрастом более 2 млрд лет сопровождается скептическим, чтобы не сказать откровенно насмешливым откликом.

В последние 40 лет одним из самых скрупулезных палеонтологов является Уильям (Билл) Шопф, профессор Университета Калифорнии в Лос-Анджелесе. Основываясь на своих исследованиях древних окаменелых микроорганизмов, он составил контрольный перечень признаков, необходимых и достаточных для подтверждения живой природы образцов. Вначале сосредоточившись на более близких по времени и хорошо сохранившихся, а потому не подлежащих сомнению экземплярах, Шопф уверенно продвигался в изучении все более и более древних окаменелостей, отдаляясь за 3 млрд лет, в область архейского эона.

Критерии, выдвинутые Шопфом, отличаются простотой и логичностью: окаменевшие микроорганизмы должны соотноситься с точно датированными осадочными слоями, залегающими в древней среде обитания этих микроорганизмов. Ископаемые остатки должны иметь единообразную форму и размер, например отчетливую форму шара, стержня или цепочки, в отличие от различного рода бесформенных черных сгустков или полосок, которые можно найти во многих древних горных породах. Кроме того, Шопф и его ученики применяют статистические методы, чтобы исключить любую субъективность, присущую исследователям древнейших осадочных пород.

Этот перечень важнейших признаков для всякого набора ископаемых микроорганизмов неплохо послужил Шопфу. Ему удалось опубликовать безупречные описания новейших ископаемых находок, а попутно подвергнуть сомнению некоторые неподтвержденные претензии конкурентов на обнаружен-

ные следы древнейших живых организмов. Его самое знаменитое выступление состоялось в 1996 г., когда ученые НАСА объявили, что обнаружены следы микроорганизмов в одном из марсианских метеоритов. В исполненной драматизма пресс-конференции, организованной НАСА в августе того же года, Шопф оказался единственным раскольником. С едва завуалированным презрением он отметил, что марсианские «окаменелости» слишком малы по размеру, лишены необходимых химических и биологических признаков и вдобавок обнаружены в несоответствующей породе. Несмотря на убедительность доводов Шопфа, президент Клинтон отозвался с похвалой об этом открытии, которое, возможно, послужило толчком для финансирования исследований НАСА в области астробиологии — деньги важны для всех нас (включая самого Шопфа), занимающихся вопросами происхождения жизни.

По иронии судьбы, сам Шопф вскоре столкнулся с весьма скептическим отношением к заявлению, которое он сделал еще в 1993 г., когда объявил об обнаружении древнейших на Земле ископаемых микроорганизмов в сланце Апекс, пачке осадков, сформировавшейся почти 3,5 млрд лет назад на северо-западе Австралии. Фотографии весьма любопытных продолговатых структур черного цвета с ячеистой сегментацией выглядели достаточно убедительно. Описание их, опубликованное в солидном научном журнале *Science*, содержало их художественно выполненные рисунки, расположенные рядом с фотографиями современных сине-зеленых водорослей, внешне похожих на окаменелые образцы. Шопф даже предположил, что найденные им окаменелости, возможно, вырабатывали кислород. В течение нескольких лет эти фотографии наиболее часто использовались в качестве самых популярных палеонтологических иллюстраций и, сопровождаемые надписью «древнейшие окаменелости», украшали многочисленные учебники, нередко вместе с предположением о том, что это были микроорганизмы обладающие фотосинтезом.

Как правило, всякое выдающееся открытие в науке должно сопровождаться выдающимися доказательствами, а также

самыми придирчивыми проверками. Все образцы окаменелостей, найденные Шопфом, хранились в Британском музее в Лондоне, в виде скрупулезно каталогизированных тонких прозрачных пластинок породы, приклеенных к предметным стеклам. В 2000 г. палеонтолог Мартин Брейзер из Оксфорда предпринял критический повторный осмотр этого сланцевого материала и пришел к совершенно иному выводу.

«Тонкие пластинки» сланца Арех, представленные Шопфом, оказались довольно толстыми, во всяком случае по сравнению с размерами микроорганизмов. Брейзер и его коллеги в конце концов исследовали большинство этих миниатюрных образцов, сфотографированных и опубликованных Шопфом, и к своему удивлению обнаружили, что большинство фотографий явно вводят в заблуждение. Каждый снимок Шопфа, ставший палеонтологической классикой, представляет собой микроскопическую фокальную плоскость — тонкий и плоский срез поперек темных трехмерных объектов. Брейзер и его сотрудники применили более современную фототехнику, которая позволила сделать трехмерные изображения и обнаружить гораздо более сложное явление. Только при наведении фокуса микроскопа в самую толщу образцов удалось воспроизвести классическое изображение окаменелостей Арех. Но стоило сдвинуть фокус выше или ниже, как такие убедительные на вид продолговатые клетки превращались в извилистые пластины или неправильной формы комки, иногда со складками, ответвлениями или изгибами. Согласно исследованиям Брейзера, «цепочки микроорганизмов» на самом деле являются произвольными поперечными срезами более сложных трехмерных структур, весьма мало похожих на что-либо биологическое. В известном журнале *Nature* за март 2002 г. Брейзер с коллегами поставил под сомнение выводы Шопфа, опубликовав статью «Подлинность древнейших ископаемых поставлена под сомнение».

Шопф выступил с опровержением, опубликовав в том же номере статью, помещенную рядом со статьей Брейзера. Шопф с коллегами представили новый анализ образцов Арех

с их углеродистыми черными вкраплениями, доказывая, что они имеют изотопные свойства и атомную структуру, характерную для биовещества. Он упрямо отстаивал «древнейшие биокаменелости», хотя отказался от утверждения, что это были микроорганизмы, обладающие фотосинтезом. Как бы то ни было, семена сомнения в правоте Шопфа были посеяны, а в поисках ранних форм жизни были приняты более строгие критерии.

В более поздней публикации Мартин Брейзер и его коллеги из Австралии объявили, что обнаружили «древнейшие окаменелости» — следы микроорганизмов в горном массиве Strelley Pool, сформировавшемся 3,4 млрд лет назад, всего в 35 км от места находок Шопфа, более древних по возрасту, но, как выясняется, сомнительных. Некоторые считают, что на этом можно поставить точку в затянувшемся научном споре.

Самые маленькие окаменелости

Представьте себе, что происходит, когда погибает колония микроорганизмов. Как правило, крошечный мешочек химических веществ, ранее бывший живой клеткой, распадается и рассеивается; крупные биомолекулы распадаются на более мелкие части, в основном на воду и углекислый газ. Самые вкусные куски могут быть съедены другими микроорганизмами, а несъедобные молекулы растворяются в океане, испаряются в атмосфере или застывают в горных породах. Обычно через несколько лет уже ничего не остается, поскольку время безжалостно к таким хрупким микроскопическим остаткам.

При необычных обстоятельствах — например, если мертвые клетки оказываются быстро погребенными, а вокруг нет разрушителя-кислорода и камень не слишком накаляется, — наиболее прочные биомолекулы могут сохраниться, хотя и в измененном виде. Больше всего шансов у молекул с прочной основой из примерно двадцати атомов углерода, иногда связанных в простую длинную цепь (с налипшими по бокам несколькими

атомами углерода), иногда в группу колец (наподобие олимпийского символа). Эти биопризнаки представляют собой нечто вроде миниатюрного скелета. Они остаются от гораздо более крупных скоплений действующих молекул, распавшихся и лишенных всего, кроме наиболее устойчивого остова.

Если обнаружить такой молекулярный скелетик в древней осадочной породе и при этом быть уверенным, что он не попал сюда из соседнего, более молодого слоя или вообще из недавно погибших живых клеток (например, от современных приповерхностных микроорганизмов или омертвевшей кожи с вашего пальца), тогда можно заявить об открытии химического ископаемого — окаменелости, т. е. атомов некогда живого микроорганизма. Отсюда и очарование черными вкраплениями, найденными Шопфом в сланцах Арех.

Многие современные специалисты, занимающиеся молекулярной палеонтологией, ведут восхитительную двойную жизнь. Они могут предпочесть суровую стезю полевого геолога, пробираясь по труднодоступной местности, вынося на себе по полсотни килограммов многообещающих образцов горных пород, добытых где-нибудь в забытых Богом закоулках прожаренной солнцем пустыни, промерзшей тундры или горных вершин. Год за годом небольшие группы отправляются в Западную Австралию, Южную Африку, Гренландию или Центральную Канаду в поисках все новых и новых образцов. Могут трудиться на буровых установках в надежде добраться до древнейших пород, не затронутых ни климатом, ни растительностью. Эти экспедиции нередко сулят многие месяцы трудностей, опасностей и лишений.

Такая полная приключений жизнь контрастирует с месяцами скучного анализа, проводимого в стерильных лабораториях, где малейший вздох или отпечаток пальца могут необратимо испортить драгоценный образец породы трехмиллиардолетней давности. Это требует времени и терпения, исключительной точности и целого арсенала сложнейших приборов — и все ради нескольких молекул, извлекаемых из добытых образцов породы. Среди самых известных пред-

ставителей этого искусства XXI в. можно назвать австралийского палеонтолога Роджера Саммонса, работающего в MIT на кафедре естествознания Земли и планет. Там он возглавляет Лабораторию Саммонса — чокнутую команду, состоящую из дюжины охотников за окаменелыми молекулами в древнейших породах нашей планеты.

Лет десять назад, работая в Австралийском национальном университете, Саммонс возглавил группу ученых, которые прославились тем, что исследовали любопытные осадочные породы в Пилбара-Кратоне на западе Австралии, горном массиве, сформировавшемся примерно 2,7 млрд лет назад. Там они получили доступ к уникальной скважине глубиной около километра, в которой обнаружился слой черного глинистого сланца, богатого углеродом, — именно в таких отложениях есть шанс обнаружить молекулярные фоссилии. Горные породы Пилбара вызывали особый интерес, поскольку они сохранились в неприкосновенности от воздействия тепловой энергии, грунтовых вод и каких-либо видов жизни на поверхности. Если когда-либо существовала порода, в которой могли сохраниться биомолекулы, они нашли именно ее.

Австралийские исследователи сосредоточили внимание на гопаноидах, превосходном виде твердых биомолекул, о которых говорится в главе 6. Гопаноиды играют важную роль в стабилизации защищающих клетку мембран и, поскольку они чрезвычайно редко встречаются вне живых клеток, являются наиболее надежными признаками живых молекул. В каждом гопаноиде есть характерный каркас из пяти связанных колец — четыре миниатюрных шестигранника (по шесть атомов углерода в каждом) и замыкающий пятиугольник (с пятью атомами углерода). Каждое такое кольцо имеет по два общих атома углерода с соседним кольцом, что вместе составляет двадцать один атом углерода на весь каркас.

Скрупулезные исследования Саммонса в австралийской лаборатории вызвали к жизни две выдающиеся статьи, опубликованные в августе 1999 г. Первая появилась в журнале *Science* (открывал список авторов аспирант Саммонса Джокен Брокс)

и описывала обнаружение в древних породах Пилбара возрастом 2,7 млрд лет особого класса молекул, называемых стеранами, впоследствии признанных древнейшими молекулярными окаменелостями, побившими прежний рекорд на целый миллиард лет.

Обнаружение стеранов может пролить свет на древние экосистемы, поскольку разные породы используют разные типы стеранов с дополнительными атомами углерода, налипающими в различных местах вокруг колец. Брокс и его команда предположили, что стераны из Пилбара свидетельствуют о существовании в то время продвинутого вида клеток, называемых эукариотами: это клетки, имеющие ядро, которое содержит ДНК. Ко времени опубликования этой статьи древнейшая из известных ископаемых эукариот имела возраст один миллиард лет, в то время как примитивные микроорганизмы, существовавшие, как считалось, около 2 млрд лет назад, не имели ядра, так что это предположение поразило, если не сказать вызвало откровенное недоверие у научной общественности. Если это открытие верно, то из него следуют только два вывода. Либо эукариоты появились намного раньше, чем считалось до того (и соответственно эволюция жизни ускорилась), либо стераны возникли гораздо раньше эукариот. В любом случае наши взгляды на происхождение жизни подлежали пересмотру.

Вторая статья, опубликованная в журнале *Nature* (уже с Саммонсом в качестве главного автора), содержала не менее поразительное сообщение о том, что черные сланцы возрастом 2,5 млрд лет с горы Мак-Рей (всего лишь около тысячи метров высотой) содержат разновидность гопаноида — молекулы, состоящей из пяти колец с дополнительным атомом углерода, прилипшим сбоку первого кольца. Эти молекулы 2-метилгопаноида присущи только цианобактериям, главному производителю кислорода на планете. Саммонс пришел к выводу, что фотосинтез шел полным ходом на Земле уже 2,5 млрд лет назад. Такая хронология вполне совпадала с известным увеличением объема кислорода в то время, но само предположе-

ние о том, что происхождение фотосинтеза можно проследить по сохранившимся фрагментам молекул, открывало далеко идущие перспективы для палеонтологии.

Однако далеко не всех убедил Саммонс. Подобно открытым ранее Шопфом «древнейшим окаменелостям Земли», «гопаноиды Саммонса» встретили серьезное сопротивление как со стороны самого Джокена Брокса (относительно собственной докторской диссертации), так и со стороны всех других исследований, где речь идет о признаках биомолекул старше 2 млрд лет. Скептики утверждают, что юные гопаноиды распространены повсюду. Даже глубоко под поверхностью земли, в горных породах живут микроорганизмы, так что за 2 млрд лет накапливается неизбежная путаница. Несомненно, гопаноиды существуют, но кто может утверждать, когда и как они появились в этих слоях породы. Будем держаться в курсе событий: всегда интересно следить за научными дискуссиями, тем более что они, как правило, ведут к новым открытиям.

Песчаные тайники времени

Где еще могут вести поиск палеонтологи? Из всех ответов, накопленных за время исследования окаменелостей, имеющих отношение к истории фотосинтеза, исследовать бактериальные маты — самый очевидный, хотя это и наименее изученная область. В наше время они образуются по всему миру в мелких прибрежных океанских водах и вдоль берегов медленно текущих рек и потоков, где стебли водорослей, переплетаясь, образуют толстые, запутанные слои. Эти прочные, похожие на ткань маты обеспечивают водорослям доступ к влажной, освещенной солнцем среде обитания и в то же время защищают от неизбежного, разрушающего воздействия течений и волн. Несмотря на свое почти вездесущее присутствие, палеонтологи почти не проявляли интереса к ископаемым бактериальным матам до того момента, как сделала свои открытия Нора Ноффке.

Более десяти лет я имел возможность помогать Норе Ноффке, профессору геобиологии в Университете Олд Доминион (Нор-

фолк, штат Виргиния), специалисту с мировым именем в области исследования древних бактериальных матов. Наделенная редкой наблюдательностью, уникальным видением перспективы и железной целеустремленностью, она избрала одну из самых малодоступных областей в мире для проведения полевых исследований. Устремляясь в отдаленные и опасные места Южной Африки, Западной Австралии, Намибии, знойного Ближнего Востока и ледяной Гренландии, она открыла такие палеонтологические чудеса, которые до этого никому и в голову не приходило искать. Нора собирала все новые и новые доказательства того, что бактериальные маты вырастали на самых древних песчаных берегах Земли.

Важность исследования бактериальных матов объясняется тем, что они должны обладать какой-то разновидностью фотосинтеза. Остатки бактерий в черных кремнях и сланцах могли появиться на глубине, далеко от солнечных лучей. Можно с некоторой уверенностью предполагать, что строматолиты на мелководье, образовавшиеся 3,5 млрд лет назад, поддерживали фотосинтез, хотя эти минерализованные бугры могли просто служить укрытием в неблагоприятных, размываемых волнами средах обитания. Однако бактериальные маты наверняка имели механизм фотосинтеза. Для чего скоплениям микроорганизмов держаться в опасной приливной зоне, если только не ради солнечного света?

Для полноты представления о достижениях Норы Ноффке можно обратиться к другим, действительно древним фоссилиям. За последние полстолетия палеонтологи в поисках древнейших форм жизни сосредоточили внимание на трех основных видах горнорудных формаций. Прежде всего это черные кремнистые сланцы вроде сомнительных сланцев Арех, обнаруженных Шопфом. Черные кремнистые сланцы стали первой палеонтологической сенсацией в начале 1960-х, когда палеоботаник из Гарварда Элсо Баргхорн обратил внимание на сланец возрастом 1,9 млрд лет, который встречается в железорудном горном массиве Ганфлинт в северной части Миннесоты и на западе Онтарио. Баргхорн тщательно исследовал тонкие, прозрач-

ные срезы мелкозернистой породы, содержащей кремний, и обнаружил, что в нем можно различить отчетливые следы окаменелых древних бактерий. Вместе с геологом Стэнли Тайлером, который десятилетием раньше впервые заметил загадочные шарообразные вкрапления в кремнях Ганфлинта, Баргхорн описал удивительный набор явно живых клеток — микроскопической экосистемы шариков, палочек и нитей, причем некоторых из них в процессе деления. Несмотря на десятилетиями возникавшие все новые заявления об открытии более древних окаменелостей, некоторые палеонтологи до сих пор считают кремни Ганфлинта содержащими, бесспорно, древнейшие окаменелости клеток, обладающих фотосинтезом.

Второй вид породы — углеродистые черные сланцы вроде тех, которыми занимался Роджер Саммонс с коллегами, по-видимому, представляют собой наиболее богатый источник окаменелых биомолекул. Глинистые сланцы, донные отложения тины и органического мусора, наверняка содержат остатки древних бактерий. Микроскопические слои сланцев, сформировавшихся в Австралии, Южной Африке и других местностях миллиарды лет назад, служат материалом для самого тщательного исследования. По мере появления более совершенных и чувствительных электронных приборов, способных различать даже отдельные молекулы, можно ждать важных открытий в этом направлении.

Третий вид формаций, содержащих окаменелости, — это строматолиты, представляющие собой слоистые куполообразные структуры из минеральных отложений, образованных ранними формами жизни. Палеонтологи, вероятно, были бы озадачены происхождением этих курганов, сохранившихся чаще всего в известняковых породах, если бы не современные живые рифы из строматолитов, встречающиеся на мелководье; самые живописные из них встречаются в отдаленном заповеднике Акульей бухты в Западной Австралии. Такие странные осадочные образования возникают, когда слизистая поверхностная оболочка бактерий, обладающих фотосинтезом современных живых рифов, формирует минеральные наслоения — слой

за слоем. Сотни строматолитов обнаружены по всему миру, в том числе в горных породах старше 3 млрд лет.

Черный кремнистый сланец, черный глинистый сланец и строматолиты — к этому списку древнейших на Земле формаций, содержащих окаменелости, Нора Ноффке добавила четвертый тип горных пород: песчаник. Вполне объяснимо то, что на песчаник не обращали должного внимания. Большинство окаменелостей сохранилось в мелкозернистых породах вроде кремнистого сланца, глинистого сланца или известняковых рифов — отсюда и внимание к черному кремнистому сланцу, черному глинистому сланцу и строматолитам. В отличие от них песчаник обладает более грубой структурой, зерна которой превышают размеры большинства микроорганизмов. К тому же песчанистые породы преимущественно сосредоточены в береговой зоне, в неспокойной полосе приливов, где все следы жизни быстро уничтожаются — разрушаются, смываются и рассеиваются. И все же Ноффке в течение двух десятилетий исследовала современные приливные отмели с их богатыми экосистемами и в результате обнаружила, что жесткие, волокнистые бактериальные маты оставляют заметные следы на песчаном мелководье вдоль линии берега. Их морщинистые отпечатки на поверхности песка напоминают складки на скатерти; они улавливают и задерживают частицы осадка в массе густых, упругих жгутов водорослей; они изменяют рисунок, оставляемый на песке рябью; под воздействием штормов они разрываются плотными кусками, которые скатываются в рулоны наподобие персидских ковров.

Большинство песчаников в естественных обнажениях на вид гладкие или слегка волнистые без всяких признаков чего бы то ни было биологического. Но однажды Ноффке попался образец с характерной морщинистой, потрескавшейся поверхностью, похожей на окаменелые бактериальные маты в древних горных породах, и она обнаружила отчетливые следы почти на всей поверхности. В 1998 г. во Французских Альпах подобные морщинистые структуры Ноффке выявила на обнажениях пород Черной горы (Montagne Noire) возрастом 480 млн лет. В 2000 г.,

после научно-исследовательской работы в Гарварде, она отправилась к еще более древним горам в Намибии (возраст 550 млн лет) и обнаружила там похожие следы. Факт существования бактериальных матов полмиллиарда лет назад отнюдь не является новостью; все палеонтологи сходятся на том, что такие маты могут встречаться повсюду и в гораздо более древних прибрежных породах. Но до Ноффке никому не пришло в голову тщательно исследовать сначала современные маты, а затем распознать подобные следы, сохранившиеся в виде бесспорных окаменелостей в древних породах.

В 2001 г. Ноффке сделала первое из своих революционных открытий, обнаружив следы бактериальных матов в горных формациях старше 3 млрд лет в Южной Африке и Австралии, т. е. гораздо раньше предполагаемого Великого кислородного события. Такие мелкие следы невозможно разглядеть под ослепительным сиянием полуденного солнца, но вечером, в конце череды долгих, утомительных и нередко бесплодных поисков, когда солнечные лучи освещают горные склоны под большим углом, характерные морщинистые структуры на обнажениях песчаника становятся отчетливо видны. «Эти отпечатки просто бросались в глаза повсюду», — вспоминает она об одном захватывающем открытии, случившемся в самом конце последнего дня полевой экспедиции в Африке.

Нора впервые обратилась ко мне в 2000 г. по рекомендации своего гарвардского наставника, палеонтолога Энди Ноула. Мы с Энди дружили еще с наших студенческих 1970-х; в какой-то момент научные дороги у нас разошлись, но обоюдный интерес к астробиологии снова нас сблизил. Ноул понимал, что исследования древних матов у Ноффке почти целиком основывались на поверхностных признаках и нуждаются в теоретическом обосновании. Рядовой палеонтолог, не имеющий опыта Ноффке в исследованиях современных матов, легко проглядел бы или попросту отмахнулся от странных ребристых отпечатков или морщинистой поверхности выходов горных пород. Ноул посоветовал ей подкрепить исследования матов аналитическими данными по минералам, биомолекулам и изо-

топам, сохранившимся в мелкозернистых слоях породы. Возможно, следы древнего углерода или концентрация характерных минералов окажутся неопровержимым свидетельством для некоторых древнейших, хотя и сомнительных, признаков бактериального мата. Мне уже доводилось работать с другими учениками Ноула, поэтому я согласился.

Первые же присланные Ноффке образцы дали нам наглядный урок о необходимости аналитического исследования. Она нашла тонкие извилистые черные слои в песчаных отложениях возрастом 3 млрд лет — в тот момент для бактериальных матов это могло оказаться рекордом древности. В этих черных отпечатках ей необходимо было подтвердить присутствие углерода с характерными для живого вещества изотопными признаками, чтобы, например, тяжелого изотопа углерода-13 было бы процента на три меньше по сравнению с тем, что характерно для типичной земной коры. Она уже написала статью для журнала *Science* и собиралась отправить ее, ожидая только единственного подтверждающего отзыва. Образцы породы были срочно экспресс-почтой отправлены из Кембриджа в Геофизическую лабораторию. Я оказался в цейтноте.

К счастью, моя коллега Мэрилин Фогель, эксперт по изотопам углерода в Геофизической лаборатории Института Карнеги, согласилась помочь. Мэрилин осмотрела образец и подсказала мне, что делать: разбить кусок породы и истолочь его в порошок, поместить по несколько микрограммов порошка в маленькие чашечки из оловянной фольги, взвесить образцы и свернуть каждую чашечку в миниатюрный шарик размером с дробинку. Эти образцы и образцы эталонного изотопа углерода были затем по очереди помещены в печь, в которой любые соединения углерода испаряются в газообразный диоксид углерода. Газ поступает в высокочувствительный масс-спектрометр, где разделяется на изотопы углерода-12 и углерода-13. Чтобы получить убедительные данные, понадобилось всего несколько часов.

Нора надеялась на коэффициент между 25 и 35, типичный для бактериальных матов. Но компьютер выдал совершенно иной результат. Изотопный коэффициент оказался равным

нулю, т. е. величине, не имеющей ничего общего с биологией. Это характерно для неорганического углерода, который в жидком виде поднимается из мантии и откладывается в виде тонких прожилок черного графита. Общий итог: черные следы в образцах Ноффке действительно содержали углерод, но, безусловно, имели небиологическое происхождение.

Памятуя об этом наглядном уроке, мы немедленно принялись за анализ других черных следов в большом количестве образцов многообещающих древних отложений, привезенных Норой из самых разных точек — из Южной Африки, Австралии, Гренландии. Время от времени мы получали коэффициент изотопов углерода на уровне 30, соответствующем бактериальным матам, и нашли другие доказательства того, что более 3 млрд лет назад на нашей планете бактерии водились во множестве вблизи песчаных берегов. И в отличие от мелких черных следов или вкраплений биомолекул находки Ноффе можно увидеть непосредственно, в масштабе целых обнажений. Ее данные можно было, как говорится, потрогать рукой.

Но остается главный вопрос: производили ли микроорганизмы из этих матов кислород или они использовали солнечный свет для более простой фотохимии? Бактерии развивались с использованием различных способов потребления солнечной энергии, и не все из этих способов сопровождались выделением кислорода. Ответ на вопрос, как обеспечивали свою жизнедеятельность организмы из бактериальных матов давностью 3 млрд лет, могут дать только будущие исследования.

Минералогический взрыв

Великое кислородное событие многими признается как важная часть истории Земли. Более 2,5 млрд лет назад атмосфера Земли содержала весьма мало кислорода. С ростом численности бактерий, имеющих фотосинтетический аппарат, и накоплением вырабатываемого ими кислорода между 2,4 и 2,2 млрд лет назад произошло резкое увеличение содержания кислорода в атмосфере — более 1% от современного уровня.

Это необратимое изменение преобразовало приповерхностную среду планеты и проложило дорогу к еще более серьезным переменам.

Как уже говорилось, эти перемены привлекли пристальное внимание многих исследователей. Вот и мы с моим давним коллегой Дмитрием Сверженским попали в их число, выступив с поразительной, хотя и несколько парадоксальной, гипотезой: большинство минералов на Земле порождены живым веществом. В течение многих веков подразумевалось как само собой разумеющееся, что мир минералов существует независимо от живой материи. Наша идея «минеральной эволюции», в отличие от традиционного взгляда, подчеркивает взаимозависимость между развитием геосферы и биосферы. Мы считаем, что добрых две трети из приблизительно 4500 известных видов минералов никак не могли образоваться до Великого кислородного события, а большинство минералов вообще не могло появиться на безжизненной планете. С этой точки зрения такие полудрагоценные минералы, как бирюза, темно-синий лазурит и бриллиантовый зеленый малахит, являются несомненными продуктами живой материи.

Причины такой взаимозависимости минералов и живой материи очевидны. Эти прекрасные минералы наряду со многими другими сформировались в подповерхностных слоях коры в результате взаимодействия насыщенной кислородом воды и древних пород. Грунтовые воды растворяют, переносят, меняют химический состав и модифицируют горные породы до высоты несколько тысяч метров. В ходе этих изменений происходят новые химические реакции, в результате которых и формируются новые формы полезных ископаемых. Мы со Сверженским составили обширный каталог минералов, порожденных таким путем из меди, урана, железа, марганца, никеля, ртути, молибдена и многих других элементов. До увеличения объема кислорода на Земле такие минералообразующие реакции просто не смогли бы состояться.

«Как насчет красной планеты Марс? — спрашивают нас коллеги. — Не является ли пораженная ржавчиной поверхность

соседней с нами планеты свидетельством того, что Марс тоже подвергся насыщению кислородом и обрел разнообразие минералов, подобное земному?» — « Нет», — отвечаем мы. Кардинальное различие состоит в том, что Марс и предположительно другие малые планеты вроде него не испытывали динамичной циркуляции насыщенных кислородом грунтовых вод, которая и обусловила минеральное разнообразие на нашей планете. Может быть, на Марсе и существуют запасы грунтовых вод, что подтверждается современными исследованиями, но вода находится в замороженном состоянии. Единственной причиной красного цвета поверхности Марса является массированная потеря приповерхностного водорода (а вместе с ним и большой части запасов воды). То небольшое количество кислорода, которое образовалось в результате потери водорода, окисляет тонкий слой поверхности Марса, но глубоко в недра коры проникнуть не может.

Наш подход к минералогическому прошлому Земли усиливает некоторые предыдущие воззрения. В 2007 г. в журнале *Science*, в статье под вызывающим названием «Дуновение кислорода до Великого кислородного события?» геохимик Ариэль Анбар с коллегами представил педантичное описание следовых элементов, обнаруженных в черных сланцах, возрастом 2,5 млрд лет, в горе Мак-Рей в Западной Австралии. Эти тонкослоистые осадки, отложившиеся в прибрежной зоне древнего океана, поначалу выглядят монотонными, но тщательный анализ открывает в них химические сюрпризы. Особенно любопытно то, что девятиметровой толщины слой возле вершины весьма богат молибденом и рением — химическими элементами, которые редко встречаются в осадочных породах, если они не подвергаются окислению. В виде окислов молибден и рений быстро вымываются из материнской вулканической породы и по рекам попадают в океан, где могут включиться в черный сланец на его дне.

Никто не оспаривает тот факт, что обогащение осадочных пород молибденом и рением свидетельствует об эрозии, происходившей 2,5 млрд лет назад. Молибденит, самая частая

форма молибдена (к тому же нередко включающая рений), отличается исключительной мягкостью и легко выкрашивается. Возможно, гранит с вкраплениями молибденита составлял склон какой-нибудь древней горы. Возможно, в результате механического выветривания микроскопические кусочки молибденита смывало водой и уносило на дно океана, где они оседали в черном илистом грунте — осадки, которым предстояло накапливаться и затвердевать, превратившись в сланцы горы Мак-Рей.

Анбар и его коллеги пришли к другому выводу: они предположили, что все это произошло в результате «дуновения кислорода», выработанного первыми клетками, способными к фотосинтезу. Возможно, местное скопление слизистых зеленых клеток сформировало микросреду, в которой оказалось достаточно кислорода, чтобы обеспечить перемещение молибдена и рения. В конце концов, у нас имеется достаточно оснований, чтобы считать несомненным увеличение объема кислорода по всей планете 2,4 млрд лет назад, так почему бы не допустить, что местами такое событие могло произойти и на 100 млн лет раньше?

Мы со Сверженским возражаем на это: молибден, рений и другие элементы могли перемещаться по многим причинам и без участия кислорода. Самые обычные содержащиеся в атмосфере молекулы серы, азота или углерода не менее успешно могут отбирать электроны и в отсутствие кислорода. Такова уж природа научных дискуссий, что любые идеи и доводы встречаются с альтернативными гипотезами и контраргументами.

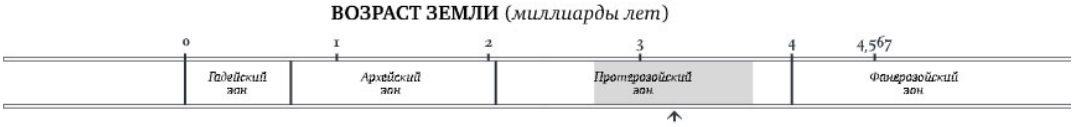
Независимо от точного подсчета времени распространения кислорода, когда Земле исполнилось 2,5 млрд лет, ее поверхность снова изменилась. Первые заметные изменения сказались на почве, когда она подверглась коррозии. Активизированные участием кислорода процессы выветривания начали разрушать железосодержащие граниты и базальты, превращая их в ржаво-красную почву. Земля старела и постепенно меняла

свою черно-серую окраску на ярко-красный цвет ржавчины. Два миллиарда лет назад из космоса материки на нашей планете — безусловно, уступавшие по размерам нынешней суше — должно быть, отчасти напоминали современную красную поверхность Марса, но картина дополнялась голубыми океанами и завитками белых облаков, что создавало живописные контрасты.

Ржавчина являлась лишь самым наглядным из многих глубоких минералогических изменений. Наша последняя химическая модель предполагает, что Великое кислородное событие привело к рождению по меньшей мере трех тысяч видов полезных ископаемых, раньше не существовавших в Солнечной системе. Сотни новых химических соединений урана, никеля, меди, марганца и ртути появились только после того, как живые клетки научились производить кислород. Многие из кристаллов, хранящихся в музеях: голубовато-зеленые медные минералы, пурпурные разновидности кобальтовых, желто-оранжевые урановые руды и многие другие — красноречиво свидетельствуют об активности живой материи на планете. Эти новоиспеченные минералы вряд ли смогли бы образоваться в лишенной кислорода среде, так что именно жизнь, прямо или косвенно, стала причиной появления большей части из известных на Земле 4500 минералов. Стоит отметить, что, в свою очередь, новые минералы снабжали живое вещество новой средой обитания и новыми источниками химической энергии, так что жизнь на Земле развивалась в тесной взаимосвязи с минералами и горными породами.

В этой сложной истории важнейшую роль играет поразительно склонный к трансформациям кислород. Алчущие электронов, атомы кислорода охотно вступают в реакцию со всеми видами минералов, выветривая камни и формируя плодородные почвы. Когда более 2 млрд лет назад содержание кислорода в атмосфере впервые достигло значительного уровня, все формы жизни, способные к фотосинтезу, обитали в океанах. Суша была абсолютно безжизненна. Но кислород открыл путь для распространения живых клеток по всей планете.

Сегодня мы находимся в непосредственном контакте с кислородом. С каждым вдохом и выдохом порция воздуха становится частицей нас, а частица нас в свою очередь становится воздухом. День за днем наши тела тают и возрождаются в постоянных химических реакциях с участием кислорода и других жизненно важных элементов. Наши ткани постоянно обновляются в течение жизни, а Земля становится последним прибежищем атомов, циркулирующих в воздухе, воде, почве и во всех формах жизни. Большинство атомов, составлявших ваше тело при рождении, впоследствии рассеивается, и атомы, составляющие ваше тело в настоящий момент, ждет та же участь, если вам повезет и вы еще поживете на родной, богатой кислородом планете.



Глава 8

«Скучный» миллиард

Минеральная революция

Возраст Земли: от 2,7 до 3,7 млрд лет

Австралийский геолог Роджер Бьюик, движущая сила сообщества исследователей ранней истории Земли, однажды описал период между палеопротерозойский эпохой (отмеченной Великим кислородным событием) и неопротерозойской эпохой (время господства ледников, распространившихся по всей планете и обусловивших любопытные направления в развитии жизни) в следующем категорическом выражении: «Мезопротерозойская эпоха — скучнейшее время в истории Земли».

Это, на первый взгляд, ничем не примечательное время, от 1,85 млрд до 800 млн лет назад, и является предметом рассмотрения в настоящей главе. Внушительный промежуток времени, именуемый промежуточным периодом (или более саркастически настроенными учеными-острословами — скучным миллиардом), вроде бы выглядит как эпоха относительного биологического и геологического застоя. Никаких явных драматических преобразований не происходит. Никаких заметных изменений в характере горных пород, крупных потрясений или перепадов климата. Граница между подвергшимися окислению поверхностными слоями океана и бескислород-

ными придонными зонами постепенно опускается все глубже, но принципиально новых форм жизни вроде бы не возникает; не появляется, по всеобщему убеждению, и новых типов ископаемых или разновидностей минералов. По крайней мере такова общепринятая точка зрения.

Но я бы не рискнул называть это время скучным. Однажды я уже совершил ошибку, назвав скучными липиды — богатый и разнообразный класс живых молекул, включающих жиры, жироподобные вещества и воски. Это замечание, сделанное во время лекции и отражающее мою неграмотность в области химической природы липидов, оказалось вдвойне ошибочным. Во-первых, липиды — удивительно разнообразный класс органических соединений. Они играют интересные роли в регулировании химических реакций в живом веществе и в выстраивании его сложнейших наноструктур. Липиды разделяют внутреннюю и внешнюю сторону большинства живых молекул. Без них жизнь в том виде, в каком мы ее знаем, не могла бы существовать. Во-вторых, я совершил ошибку, неосмотрительно высказавшись подобным образом в присутствии внимательного химика, дамы без малейшего чувства юмора, чья научная карьера была построена как раз на исследовании липидов. Она совершенно справедливо сделала мне выговор, а затем обрушила на меня гору специальной литературы, дабы восполнить пробел в моем образовании. Во искупление вины я был вынужден прочитать все эти многословные (и очень скучные) труды.

Дело в том, что скука вызывается скорее нашим беспредельным невежеством, чем природной тупостью. Скучный миллиард в истории Земли можно уподобить тому периоду человеческой цивилизации, который называют Темными веками, или ранним Средневековьем, — весьма динамичному времени великих перемен и экспериментов, неумолимых и необратимых изменений, открывших путь к современному миру, но некогда полностью игнорируемых учеными. Наше невежество способно укореняться в нас самих. Честолюбивые молодые ученые, жаждущие утвердиться в науке в короткий промежуток времени между студенческой скамьей и получением

докторской степени, вряд ли предпочтут в качестве предмета исследования геологическую эпоху, в течение которой, по всеобщему мнению, ничего особенного не происходило.

Однако геологические пласты того загадочного времени могут преподнести немало сюрпризов проницательному исследователю. Разгадки удивительных трансформаций кроются глубоко в недрах Земли, о которых мы еще так мало знаем. Именно тогда, по-видимому, сформировались некоторые из наиболее ценных пород полезных ископаемых — обширные месторождения свинца, цинка и серебра в Замбии и Ботсване (Африка) на пространстве от Невады до Британской Колумбии (Северная Америка), в Чехии и Австралии. В это же время возникли запасы и таких редких минералов, как бериллий, бор и уран. Появляется все больше данных, подтверждающих, что земные материки именно в течение этого «скучного» миллиарда лет вначале соединились в единственный гигантский континент, потом снова распались и вновь соединились в величественном цикле формирования земной поверхности. Именно за время этого миллиарда лет на мелководье и в прибрежных зонах скопилось огромное количество микроорганизмов — сегодня мы можем лицезреть их в виде хорошо сохранившихся окаменелостей. Иными словами, о «темных веках» Земли мы можем узнать много нового и интересного.

История перемен

Самое значительное событие в исторической саге Земли произошло спустя примерно пару сотен миллионов лет после того, как планета отметила свой 2,5-миллиардный день рождения. Сгустилось Солнечное газово-пылевое облако, и образовалось Солнце. Пыль вокруг него расплавилась и образовала хондры. Хондры сгруппировались в планетезимали, планетезимали — в Протоземлю и другие небесные тела, диаметром тысячи километров. Столкновение с Тейей и последующее образование Луны, раскаленный океан магмы, загустевшей до черной базальтовой коры, испещренной тысячами действующих вул-

канов, горячее море, вскоре покрывшее почти всю затвердевшую поверхность, так что из воды торчали лишь конические верхушки вулканов — все эти драматические события произошли за какие-нибудь полмиллиарда лет. Даже в менее бурные 2 млрд лет, проследовавшие за образованием уникального океана Земли, поверхность нашей планеты постоянно менялась, по мере того как на расплавленном базальте формировались граниты, а протоконтиненты вырастали на конвекционных ячейках, управлявших глобальной тектоникой.

Именно в таком динамичном, подвижном мире возникла жизнь, развиваясь и постепенно осваивая производство кислорода. Постоянные перемены стали главной особенностью Земли. Как начинающий скульптор, наша планета лепила свою поверхность вновь и вновь и каждый раз пробовала что-то новое.

Могла ли такая динамичная планета вдруг ни с того ни с сего впасть в длительный застой?

Ответ заключается в том, что никакого застоя на Земле не было и в пресловутый скучный миллиард. Перемены продолжались, хотя и не такие резкие, как гигантское столкновение с Тейей или Великое кислородное событие. «Скучный» миллиард стал свидетелем важных процессов, сформировавших новые горные породы и залежи ценных ископаемых, а также появления множества минералов. Что особенно важно, геологические данные, собранные по всей планете, показывают, что это было время глобальной тектоники, сформировавшей облик Земли, каким мы видим его и по сей день.

Цикл образования суперконтинентов

Привычная география Земли с ее океанами и материками с геологической точки зрения недолговечна. Привычные очертания обеих Америк, Европы и Африки, просторы Атлантического океана; протяженная в восточном направлении Азия; громадный Тихий океан, окаймленный на юге островами и материком Австралии; полярный мир Антарктики — все это

лишь геологическое мгновение. Мощный процесс глобальной тектоники не только формирует континенты, но и неустанно передвигает их по планете. Вода и суша вновь и вновь меняют облик.

Группа опытных исследователей взяла на себя труд изучить древнюю географию Земли и составила замечательные, хотя и приблизительные, карты былого и будущего нашей планеты. Они приняли во внимание множество факторов. Например, известно, с какой скоростью и в каких направлениях движутся в наше время континенты. Год за годом расширяется Атлантический океан, Африка явно раскалывается на два материка; мы также с изумлением наблюдаем, как Индия постепенно врезается в Китай, сминая зазубренную линию Гималаев. Конечно, это происходит очень медленно, но неуклонно, 2–3 см в год; однако на протяжении сотен миллионов лет даже движение со скоростью улитки может вызвать гигантские изменения. Можно прокрутить воображаемую видеозапись географии Земли назад и вперед и таким образом представить себе, как меняется капризный лик нашей планеты. Богатый набор окаменелых остатков растений и животных может помочь ученым нарисовать картину планеты, какой она была даже полмиллиарда лет назад, если судить по тому, какими разными путями шла эволюция флоры и фауны на разделенных в пространстве материках. Например, разнообразные сумчатые животные Австралии или бескрылые птицы Новой Зеландии могут рассказать увлекательную историю зоологической изоляции.

Уходя вглубь истории на время 500 млн лет и более, мы замечаем, как картина начинает тускнеть; приходится искать другие путеводные нити. Необычайные подсказки дает нам древний магнетизм, заключенный в вулканических породах. Мы привыкли представлять себе магнитное поле Земли, ориентируясь по направлению север–юг, согласно ориентации стрелки компаса, но на самом деле все гораздо сложнее. Силовые линии магнитного поля Земли пересекают планету под углом, называемым магнитным наклонением. В плоскости экватора накло-

нение близко к нулю, т. е. почти горизонтально, но на более высоких широтах угол наклонения возрастает, становясь почти вертикальным на полюсах. Точные измерения древнего магнитного поля, застывшего в вулканической породе, дают нам возможность выяснить как ориентацию север–юг, так и широту, на которой находился материк, когда эта порода превратилась в твердь.

Замечательно, что такое трудноуловимое свидетельство показывает, что некоторые породы, ныне расположенные на экваторе, некогда находились поблизости от полюса — и наоборот. Находки в Антарктике окаменелостей, относящихся к древним тропическим лагунам, или обнаружение в экваториальной Африке окаменелостей, характерных для тундры, подтверждают этот вывод. Исследование осадочных пород добавляет существенные данные. В различных средах накапливаются различные виды отложений: на мелководье, на континентальных шельфах, в тундре, озерах ледникового происхождения, в приливно-отливных лагунах и болотах формируются разные типы пород.

Опираясь на эти подсказки, специалисты по палеогеографии составили связную и вполне допустимую картину Земли, какой она была 1,6 млрд лет назад, т. е. в самый разгар скучного миллиарда, а также высказали ряд предположений относительно более древнего периода — времен формирования первых континентов. В переломный момент сдвига тектонических плит на самой линии разлома, где плотные блоки первоначальной базальтовой коры погружались в недра мантии, непотопляемые куски менее плотных гранитных островков нагромождались друг на друга, образуя все более крупные, устойчивые и долговечные участки суши. Эти древние куски того, что впоследствии стало континентами, известны под названием «кратон» (от греч. κράτος — «сила, крепость»).

Кратоны действительно очень прочны; однажды образовавшись, они существуют очень долго. До наших дней на Земле сохранилось не менее трех дюжин более или менее невредимых кратонов, причем некоторым из них исполнилось 3,8 млрд

лет, а их размер составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч километров в поперечнике. Эти части разных древних континентов за несколько миллиардов лет пропутешествовали едва ли не через всю планету, причем каждый имеет собственное имя: Слейв и Сьюпириор в Северной Америке, Каапвааль и Зимбабве в Африке, Пилбара и Йилгарн в Австралии. Стиснутые вместе или оторванные друг от друга, наряду с более мелкими обломками древней суши, они сохранились в качестве остатков фундамента древних континентов. Гренландия стоит на трех таких кратонах, а большая часть центральной Канады и северных районов штатов Мичиган и Миннесота включает целый набор. Значительные части Бразилии и Аргентины покоятся на нескольких кратонах, что верно и в отношении больших территорий северной, западной и южной Австралии, Сибири, Скандинавии, крупной части Антарктики, некоторых регионов восточного и южного Китая, большей части Индии и некоторых полос в западной, южной и центральной Африке. Все эти кратоны начали формироваться более 3 млрд лет назад — еще до образования тектонических плит, когда суша составляла лишь незначительную часть земной поверхности. Вот почему кратоны являются очевидцами бурной юности Земли, хотя и слегка помятыми и покоробленными.

Кратоны — это ключи к ранней истории Земли, как розетские камни для археологов. Океанов недостаточно, чтобы расшифровать письмена ранней эпохи земной истории. Благодаря безостановочному конвейеру глобальной тектоники, порождающей, в частности, базальтовую океаническую кору в центрально-океанических хребтах и снова поглощающей ее в зонах столкновения, возраст древнейшего океанского дна не превышает 200 млн лет. Все, что старше, можно обнаружить лишь на континентах, если оно вообще сохранилось.

Странствующие кратоны отличаются удивительно сложной историей. Приводимые в действие движением тектонических плит, они перемещаются, сталкиваясь друг с другом и образуя составные кратоны и суперкратоны, которые, в свою очередь, сбиваются в гигантские пространства суши — континенты

или суперконтиненты. Каждое столкновение порождает новую горную гряду вдоль линии соединения кратонов; каждая гряда содержит интереснейшие данные о древней сборке участков суши. Суперконтиненты, в свою очередь, раскалываются и разделяются на самостоятельные материки или острова, омываемые со всех сторон океанами. Каждый раз, когда происходит раскол континента, между расходящимися частями расширяется полоса океана и формируются характерные отложения: сначала песчаники и известняки на мелководье, затем глубоководные глины и глинистый сланец. Именно такая последовательность осадочных пород указывает на раскол континентов. Суперконтиненты соединялись и расходились вновь и вновь. Это напоминает гигантский пазл, и картинка, которую надо сложить, неизвестна, к тому же ее части постоянно меняют свои формы и местоположение.

Что здесь общего со скучным миллиардом? Все. Чтобы представить себе этот период, лишенный явных признаков активности, — без крупных катастроф, без растительности, поскольку разнообразная флора и фауна появятся позднее, — нам следует обратиться к специалистам по палеогеографии. Пытаясь разобраться в деталях головоломки кратонов, перемещавшихся по планете в течение миллиардов лет, эти неутомимые труженики забираются в самые отдаленные уголки планеты, картируют горные породы, собирают образцы, а затем подвергают их мыслимым и немыслимым лабораторным испытаниям.

Ядро каждого кратона составляют древнейшие породы, старше 3 млрд лет. Эти фрагментарные свидетельства древнейшей земной коры в целом составляют скромную долю в общей материковой массе. Они непрестанно подвергаются воздействию тепловой энергии и давления, меняют свой состав, растворяясь в приповерхностных водах, и деформируются при напряжении земной коры. Даже при таких условиях природу первоначальных пород, будь то гранитные вкрапления или осадочные слои, чаще всего можно определить. Более того, нам помогает даже то, что кратоны не остаются в покое.

Вся история их существования отмечена пульсацией магмы, когда ее новые всплески расплавляют старые структуры, формируя жилы и гнезда вулканических пород. Новые осадочные месторождения возникают как внутри материка, в реках и озерах, так и вдоль мелководья на песчаных морских побережьях. Отличительные типы и структуры горных пород формируются и во время столкновения или раскола кратонов — событий, для которых характерно движение крупных массивов суши. Тщательное исследование этих более молодых формаций позволяет выделить последовательность формирования горных пород в истории существования кратона. Здесь-то и начинается самое интересное.

Более молодые породы дают подсказку для определения хронологии перемещений кратона. Вулканические породы содержат мелкие кристаллы магнетиков, которые в процессе отвердевания ориентируются по магнитному полю Земли. Тщательные палеомагнитные исследования помогают определить не только направление предшествующих магнитных полюсов севера и юга, но и примерную широту, на которой произошло остывание пород. Эти данные, конечно, не сравнить с координатами GPS, но они позволяют относительно точно фиксировать положение кратонов на временной оси. Исследование осадочных пород позволяет узнать многое о климате и экологии. Осадочные отложения, возникшие в условиях тропиков, значительно отличаются от пород, сформировавшихся в умеренных или ледниковых зонах более высоких широт. Некоторые осадочные породы также включают кристаллы магнетиков, по которым можно определить расположение полюсов.

Чтобы сформировалось даже самое приблизительное представление о меняющемся облике Земли, целые армии геологов тщательно обследуют каждый из трех дюжин кратонов. На это уходят десятилетия трудоемких полевых экспедиций и лабораторных исследований. Данные, собранные по всей планете, сводятся вместе. Затем все кратоны составляются, и получается воображаемый фильм об их странствиях, начиная с географии современного мира и постепенно уходя вглубь прошлого.

Чем глубже мы погружаемся в прошлое, тем общая картина неминуемо становится все более расплывчатой и умозрительной. Тем не менее даже то, что удается восстановить, поражает воображение. Согласно современным представлениям, за три последних миллиарда лет Земля претерпела цикл по меньшей мере пяти слияний и расколов суперконтинентов.

Наши познания об истории древнейшей земной суши пока не очень глубоки, и существующие подходы к этому предмету сопровождаются многочисленными разногласиями. Никто не рискует, по крайней мере пока, предложить даже приблизительный набросок карты земной поверхности 3 млрд лет назад, но в одной достаточно обоснованной модели предполагается, что первый в истории Земли континент, называемый Уром, сформировался около 3,1 млрд лет назад из ранее рассеянных частей, сейчас известных как Южная Африка, Австралия, Индия и Мадагаскар. Существует предположение, что еще до того, примерно 3,3 млрд лет назад, существовал суперконтинент Ваальбара, но достаточных доказательств этому нет. Согласно сравнительным палеомагнитным данным, полученным из всех регионов, предположительно составлявших древний Ур, современные отдельные кратоны большую часть древней истории Земли были единой сушей — их перемещения по планете выглядят практически параллельными, а потому, возможно, связанными. Магнитные данные позволяют считать, что суперконтинент Ур оставался целым почти 3 млрд лет и начал разделяться только около 200 млн лет назад.

Древнейший гипотетический суперконтинет Кенорленд, или Сьюпириор (по названию горных местностей в Северной Америке), как полагают, сформировался около 2,7 млрд лет назад из Ура и соединившихся с ним множества мелких разрозненных кратонов. Столкновение одного кратона с другим всегда сопровождается образованием шва, соединительной линии, где под воздействием гигантских сил сжатия образуется новый горный хребет. Множество признаков этого можно обнаружить в породах возрастом от 2,7 до 2,5 млрд лет, что подтверждает последовательный рост суперконтинента. Палеомагнит-

ные данные показывают, что Кенорленд большую часть своего сравнительно недолгого существования располагался в низких широтах, возможно, пересекая экватор.

Параллельно с этими ранними перемещениями материков появились первые крупномасштабные выветривания и массированные осадочные отложения по океанскому мелководью вдоль береговых линий. Согласно большинству моделей ранней истории Земли, древняя атмосфера существенно отличалась от современной. В ней практически отсутствовал кислород, зато содержание углекислого газа в сотни, если не в тысячи, раз превышало нынешние пропорции. Шли углекислые дожди, вызывая эрозию почвы и превращая твердые камни в глину. Реки несли свои мутные потоки в прибрежные мелкие воды океана, и там формировались вязкие, дельтаобразные клинья рыхлых отложений.

Около 2,4 млрд лет назад, почти одновременно с началом накапливания в атмосфере кислорода, Кенорленд пережил оборотную сторону процесса формирования суперконтинента. Геомагнитные данные показывают, что Ур распадался на разные кратоны как раз тогда, когда Кенорленд начал длительный процесс раздробления. Эти фрагменты кратоновой головоломки сдвинулись от экватора к полюсам. Между расходящимися кусками материка образовывались мелкие моря, где формировались мощные осадочные месторождения. Так начался многосерийный суперконтинентальный цикл.

Салют Колумбии

Включение суперконтинентального цикла в геологические анналы делает скучный миллиард гораздо менее скучным. Следующая суперконтинентальная серия, гораздо более внятная, чем Кенорленд, благодаря более молодым и лучше сохранившимся сериям горных пород, началась около 2 млрд лет назад, когда на Земле существовало как минимум пять самостоятельных континентов. Крупнейшим из них был суперкратон Лаврентия, скопление около полудюжины кратонов в несколько

тысяч километров в поперечнике, что значительно превышает нынешнюю центральную и восточную части Северной Америки. (Специалисты по древним материкам иногда называют это скопление кратонов Соединенными Плитами Америки.) Первый континент Ур твердо держал второе место по размерам, будучи отделен от Лаврентии обширным океаном.

Им значительно уступали Балтийский и Украинский кратоны, сформировавшие ядро нынешней Восточной Европы, а также кратоны, составлявшие части современной Южной Америки, Китая и Африки и бывшие фактически большими островами, близкими по размерам континенту. Ко времени, когда Земле исполнилось 1,9 млрд лет, эти участки суши соединились по границам континентальных плит, воздвигнув новые горные хребты и сформировав суперконтинент, известный под разными именами: Колумбия, Нена, Нуна или Хадсонленд. (Название Колумбия основано на убедительных геологических доказательствах, полученных в окрестностях реки Колумбия вдоль границы между штатами Вашингтон и Орегон, и употребляется чаще всего.) Эта обширная бесплодная земля, протяженностью примерно 13 000 км с севера на юг и 5000 км с запада на восток, объединила почти всю континентальную кору планеты.

Сложность объединения более тридцати кратонных блоков в единый суперконтинент озадачивает. Неудивительно, что этот процесс описывают несколько моделей. Две сравнительно разные гипотезы появились практически одновременно в 2002 г. Геохимик Джон Роджерс (Университет Северной Каролины) и его коллега, индийский геолог Сантош Мадхава (Университет Коти, Япония), предположили, что Лаврентия, которая, по существу, равна всей Северной Америке, составила ядро суперконтинента Колумбия. Согласно модели Роджерса–Сантоша, континент Ур присоединился к западному побережью Лаврентии; части Сибири, Гренландии и Балтики располагались севернее; фрагменты того, что сейчас является Бразилией и Западной Африкой, размещались к юго-востоку. В том же году Гохун Чжао с коллегами (Университет Гонконга)

выдвинул несколько иную модель, по которой Балтика присоединилась к восточному побережью Лаврентии, а восточная часть Антарктиды и Китай — к западному. Если учесть древний возраст Колумбии и предположительную природу таких реконструкций, обе гипотезы неплохо дополняют друг друга. Тем не менее ясно, что перемещения и превращения указанных кратонов останутся предметом научных дискуссий на ближайшие десятилетия.

Как бы то ни было, сборка Колумбии, начавшаяся 1,9 млрд лет назад, подготовила период скучного миллиарда. Каковы бы ни были обстоятельства формирования суперконтинента Колумбия на самом деле, можно с некоторой уверенностью утверждать, что большую часть его составляла засушливая, жаркая, ржавого цвета пустыня без всяких признаков растительности. Из космоса Земля, должно быть, выглядела странной, кособокой планетой с одним-единственным красноватым континентом, окруженным со всех сторон обширным голубым океаном, пока еще безымянным. Все континенты собрались в районе экватора, и только оба полюса украшали скромные ледяные шапки. Уровень воды в океане был достаточно высок, чтобы в прибрежных регионах континента сформировалось несколько внутренних мелководных морей.

Экваториальный суперконтинент Колумбия предположительно послужил точкой отсчета скучнейшего периода в истории Земли, но что именно делает его таким скучным? Что на самом деле означает застой, какие именно параметры оказались устойчивыми? Глобальный климат и дожди? Природа и размещение живой материи? Состав океана или атмосферы? Какие измерения подтверждают этот пресловутый застой? И наоборот, что остается недоказанным?

Застой

Большинство аспирантов, изучающих геологию, просто не обращают внимания на геологические формации, возникшие от 1,85 млрд до 850 млн лет назад. Четыре года, отведен-

ные на написание диссертации, желание выделиться и получить постоянную преподавательскую должность являются слишком коротким сроком, чтобы потратить его на столь малообещающую геологическую эпоху. Но Линда Ках считала иначе. Ее наставником в MIT был Джон Гротцингер, ведущий специалист в изучении древнейших горных пород Земли возрастом старше 2 млрд лет. В Гарварде руководителем ее диссертации стал Энди Ноул — известнейший палеонтолог, который в свое время вдохновил Нору Ноффке на изучение бактериальных матов. Линда Ках не могла не отметить того, что Земля старше 1,8 млрд лет (описанная Гротцингером) поразительно отличалась от Земли моложе 0,8 млрд лет (описанной Ноулом). Должно быть, в период скучного миллиарда произошло нечто любопытное, и Ках вознамерилась выяснить это. А потому она занялась изучением мезопротерозоя — огромного промежутка времени в истории Земли от 1,6 до 1,0 млрд лет назад, т. е. периода, охватывающего большую часть скучного миллиарда.

Даже если считать мезопротерозой временем застоя, сам по себе факт миллиарда лет стабильности примечателен. Постоянные изменения — вот характерная черта Земли. Океаны и атмосфера, поверхность и недра, геосфера и биосфера — все эти аспекты нашей планеты непрестанно менялись на протяжении геологических эпох. Как же могло случиться, что на протяжении миллиарда лет Земля не испытала никаких серьезных перемен, никаких значительных сдвигов в приповерхностных зонах, ничего нового в живой и неживой природе? Неужели в этот период установилось гармоническое равновесие между климатическими условиями и жизнью? Могло ли такое произойти?

За неторопливым завтраком в Университете Теннесси Линда Ках терпеливо описывала драматические и неоднократные трансформации (значит, мезопротерозой вовсе не был скучным). Линда хорошо подготовилась к встрече: захватила стопку чистой бумаги, на которой во время беседы чертила пояснительные диаграммы синими и красными чернилами.

«Эти мысли появились у меня еще десять лет назад», — рассказывала она, описывая изнурительную экспедицию в условиях труднопроходимой мезопротерозойской горной местности в Мавританской пустыне на северо-западе Африки. Линда была бы не против снова отправиться туда, но рост преступности и похищения людей в этом регионе делают такую поездку просто авантюрой. Вместо этого она намеревается войти в научно-исследовательскую группу в следующем полете на Марс — гораздо более безопасный выбор.

Ках занимается преимущественно исследованием глобальной тектоники и того беспорядка, который она вносила в прошлое Земли, — постоянные перемещения, столкновения, расколы и соединения крупных массивов суши, благодаря которым облик планеты радикально менялся каждые 100 млн лет. Даже в течение 300 млн лет, предшествующих скучному миллиарду (когда суперконтинент Колумбия более или менее сохранял целостность), движение тектонических плит не прекращалось. Примечательной особенностью суперконтинентов является то, что они постепенно прирастают с внешних границ, по мере того как океанские плиты вонзаются в них и на побережье образуются новые вулканы. В наши дни расширение северо-западного побережья Тихого океана, где все еще сохраняются такие грандиозные действующие вулканы, как Маунт-Рейнир, Маунт-Худ и Маунт-Олимпия, хорошо иллюстрирует эту особенность. Так же обстояло дело и с расширением границ Колумбии.

Континентальная кора разрасталась еще значительнее, когда Колумбия время от времени подвергалась раскалыванию на более мелкие материки и острова. Около 1,6 млрд лет назад — начало мезопротерозоя — отделение и дрейф Ура на запад от Лаврентии, а остатков Колумбии — на восток привело к образованию большого межкратонного моря и массированному отложению осадочных пород толщиной более 20 км. Это гигантский рифт, называемый супергруппа Белт-Персел, который охватывает почти все западное побережье Канады и северо-запад США. Таким образом, когда суперконтиненты раскалывались и деформировались, из старых континентальных пород возникали новые.

Раскалывание Колумбии на два расходящихся материка сопровождалось и другими последствиями. Лаврентия, Ур и остальные континенты по-прежнему группировались вокруг экватора, т. е. в районе полюсов континентов не было, а это означает, что там еще не сформировался плотный ледяной покров, следовательно, уровень воды в океанах был все еще достаточно высок. Новое западное побережье Лаврентии было изрезано мелководными морями; по-видимому, суша составляла менее четверти земной поверхности. На некоторое время (может быть, чуть больше 200 млн лет) территория суши значительно сократилась, и одновременно шло накопление осадочных пород на мелководье по всей планете — накапливались отложения, которые ныне являются важным источником информации. Отсутствие льда означало отсутствие ледников. Период с 1,6 до 1,4 млрд лет назад не отмечен никакими характерными признаками ледников — скоплений окатанных льдом булыжников и валунов, песка и гальки, которые обнаруживаются в большинстве других геологических эпох. Так что скучный мезопротерозой тоже стал свидетелем многих перемен, даже если с геологической точки зрения эти перемены были, что называется, в порядке вещей.

Вернемся к суперконтинентальному циклу: сборка Родинии

Скучный миллиард стал свидетелем формирования не одного, а двух суперконтинентов. Обломки Колумбии расходились в разные стороны примерно в течение 200 млн лет, но после этого наступает предел — и из обломков начинает неизбежно формироваться новый континент. Около 1,2 млрд лет назад Ур, Лаврентия и другие мезопротерозойские континенты начали соединяться, образуя новый материк, называемый Родиния (от русского слова «родина»). Данные горных пород на окраинах Европы, Азии и Северной Америки сохраняют свидетельства об интенсивном горообразовании по всему миру между 1,2 и 1,0 млрд лет назад: каждый раз при столкновении и деформации кратонов появлялся новый горный хребет.

Точная география Родинии все еще является предметом научных дискуссий, но геологические и палеомагнитные данные вкупе с расположением кратонов в наши дни накладывают существенные ограничивающие условия. Согласно большинству теорий, суперконтинент целиком располагался в области экватора, и центр его составляла Лаврентия (ныне большая часть территории Северной Америки), а крупные части других материков примыкали к нему с севера, юга, востока и запада. Некоторые полагают, что Балтика и фрагменты того, что ныне составляет Бразилию и Западную Африку, располагались на юго-востоке, в то время как части Южной Америки примыкали с юга, а фрагменты Африки — с юго-востока, хотя при таком раскладе остается неясным расположение Австралии, Антарктиды, Сибири и Китая.

Линда Кох методично раскладывает свои доводы по полочкам, но чувствуется, что она явно неравнодушна к избранному ею геологическому времени. Несмотря на скудные геологические данные ближе к концу этого периода, за огромный временной промежуток от 1,85 млрд до 850 млн лет назад произошли значительные изменения вследствие танцев кратонов. За этот скучный миллиард лет образовались два суперконтинента, причем столкновение кратонов при этом сопровождалось формированием дюжины горных хребтов. В промежутке между образованием этих суперконтинентов в результате распада Колумбии были заложены основы крупнейших на Земле осадочных месторождений. Большая часть земной суши уходила под воду, а затем снова высыхала. Скорость формирования осадочных пород значительно менялась. Ледники появлялись и исчезали. Довольно много событий для такого «скучного» времени. Но есть и другая сторона вопроса.

Промежуточный океан

Вне зависимости от точной геометрии планеты, все согласны, что суперконтинент Родиния должен был омываться еще более обширным суперокеаном, водным пространством, именуемым

Мировия (от русского слова «мировой»). Геохимики, изучающие прошлое нашей планеты, пришли к выводу, что если мезопротерозойскую эпоху считать скучной, то виной тому является Мировия.

Великое кислородное событие — весьма динамичный период в истории Земли от 2,4 до 1,8 млрд лет назад — было прежде всего эпохой перемен в химическом составе атмосферы. За это время состав атмосферы изменился, главным образом за счет увеличения количества кислорода: от нуля до 1–2%. Это гигантское изменение для приповерхностной среды, но для океанов оно является незначительным событием.

Причина кроется в сравнительных объемах. Масса океана в 250 раз больше массы атмосферы. Любое мелкое изменение в химическом составе атмосферы, даже 1%-ный прирост кислорода, лишь через длительный период времени сказывается на океанах — для этого требуется около миллиарда лет.

В стремлении понять природу океана геохимики обращаются к составляющим его химическим элементам и их изотопам. До 2,4 млрд лет назад океанская вода была насыщена раствором железа, и устойчивость этого состава была обусловлена отсутствием в ней оксидантов, которые заставили бы окислы железа выпадать в осадок, а также малым количеством серы (ее наличие привело бы к образованию пирита и других сульфидов). После изменений в составе атмосферы (Великого кислородного события) часть растворенного в воде железа на мелководье превратилась в окислы железа, причем либо непосредственно вступая в реакцию с кислородом, либо взаимодействуя с окисленными веществами на суше. Атмосферный кислород также привел к окислению и эрозии минералов, содержащих серу, которые, попадая в океанскую воду, в свою очередь, поглощали железо.

Эти химические изменения послужили толчком к образованию множества месторождений железистых кварцитов — плотных осадочных пород на дне океанов, в которых сочетались разноцветные слои железистых минералов, ныне составляющих большую часть железорудных месторождений

на планете. Образование таких формаций происходило постепенно, а железа в составе океанской воды было много, и этот процесс занял следующие 600 млн лет. К началу скучного миллиарда океанские воды все еще оставались бескислородными, но уже потеряли значительную часть растворенного железа.

Передвинемся вперед на миллиард лет: водоросли продолжали производить кислород, который начал постепенно распространяться по океанам; 600 млн лет назад вода в океанах по всему земному шару уже была сверху донизу насыщена кислородом. То, что происходило между этими датами, — загадка «скучного» миллиарда — носит название промежуточного океана.

В 1998 г. геолог Дональд Кэнфилд из Университета Южной Дании предположил, что не кислород, а именно сера играла решающую роль в промежуточном океане. (С тех пор многие ученые именуют серонасыщенный мезопротерозойский океан не иначе как Океан Кенфилда.) Его наводящая на размышления статья под названием «Новая модель химического состава протерозойского океана» была опубликована в журнале *Nature* 3 декабря 1998 г. (после целого года задержки, вызванной сопротивлением рецензентов) и почти сразу перевернула представления многих из нас о древних состояниях Мирового океана.

Его основная мысль проста. Великое кислородное событие породило достаточное количество кислорода, чтобы повлиять на распространение многих элементов, «чувствительных к окислительно-восстановительным процессам», включая железо, но этого количества было недостаточно, чтобы окислить океан. С другой стороны, растущая эрозия и окисление почвы наполнили океан сульфатами. Вследствие этого промежуточный океан оказался насыщенным серой, испытывая в то же время нехватку кислорода и железа, и в таком состоянии просуществовал на протяжении миллиарда лет.

Ожидание

Ископаемая летопись возродила гипотезу о постоянном медленном изменении промежуточного океана. Некоторые породы,

сформировавшиеся между вторым и первым миллиардами лет назад, содержат микроскопические окаменелости непревзойденного качества. Ганфлинтское месторождение кремнистого сланца в Северной Америке возрастом 1,9 млрд лет, Гаоюжуаньская формация на севере Китая (1,4–1,5 млрд лет) и Авзянская формация на Урале в России (1,2 млрд лет) содержат микроскопические ископаемые остатки микроорганизмов, настолько ясные и отчетливые, некоторые даже в процессе деления, что они выглядят точь-в-точь как современные живые экземпляры. Однако такая замечательная сохранность окаменелостей свидетельствует лишь о стабильности условий, а не о принципиально ином характере этого периода в истории Земли.

Длительное существование бескислородного, сернистого промежуточного океана стало одновременно неблагоприятным и благоприятным условием для развития жизни. Благоприятным был приток сульфатов — прекрасный источник энергии для некоторых видов микроорганизмов: их жизненный цикл держался на превращении сульфатов в сульфиды. Информация, полученная при исследовании окаменелостей, включая характерные молекулярные биомаркеры, данные изотопов серы и некоторых хорошо сохранившихся микроорганизмов в кремнистом известняке — все указывает на то, что в мезопротерозойскую эпоху процветала прибрежная популяция зеленых и пурпурных бактерий. Микроорганизмы, живущие за счет серы, существующие и теперь в бескислородной среде, производят органические серные соединения с отвратительным запахом — похожим на запах сточных вод.

— Мезопротерозой был самым вонючим периодом в истории Земли, — шутит Линда Кох.

— В какой период он был вонючим? — спрашиваю я.

— По-моему, с начала до конца, — отвечает она.

Неблагоприятным обстоятельством для развития жизни была зависимость от азота. Газообразный азот (N_2) составляет 80% современной атмосферы. Проблема состоит в том, что биохимическая природа живого вещества не принимает

газообразный азот; живая материя потребляет его в восстановленной форме, т. е. в виде аммиака (NH_3). Поэтому живая клетка выработала весьма полезный белок, фермент под названием нитрогеназа, способный превращать азот в аммиак. Но здесь и кроется ловушка, как убедительно объясняют в своей статье, опубликованной в журнале *Science* в 2002 г., Ариэль Анбар и Энди Ноул. Нитрогеназе необходим комплекс атомов, содержащих серу и металл — железо или молибден, но ни того, ни другого в промежуточном океане не было. Железо исчезло при формировании железистых кварцитов, так что выбора не было. С другой стороны, молибден растворим только в насыщенной кислородом воде, как в современных океанах. В бескислородный период промежуточного океана молибден обнаруживался лишь на мелководье, поблизости от побережья, подвергаемого воздействию атмосферы, — это и была та среда, в которой предположительно размножались микроорганизмы.

В результате вслед за основополагающей статьей Кенфилда хлынул поток публикаций, связывающих геохимию и палеонтологию мезопротерозоя — две дисциплины, представители которых еще двадцать лет назад даже не общались друг с другом. Вывод очевиден: промежуточный океан стал пристанищем микроорганизмов, но эти формы жизни могли существовать только вблизи побережья. Поглощающие серу бактерии сосуществовали там с порождающими кислород водорослями. В течение миллиарда лет жизнь продолжалась, но это сопровождалось лишь немногочисленными биологическими инновациями.

Минеральный взрыв

Обратимся к минералогии — еще одной области науки, которая долгое время преподавалась в странной изоляции от грандиозной истории Земли, в таком же отрыве от геохимии и палеонтологии, как обе эти науки друг от друга. Объяснить это трудно, поскольку все, что нам известно о далеком прошлом Земли, получено на основе информации о минералах. Однако боль-

шинство минералогов редко обращаются к возрасту или эволюции исследуемых ими образцов. Напротив, более двух столетий минералоги занимались в основном их неизменными физическими и химическими свойствами. На протяжении всей моей жизни минералогическая литература описывала такие свойства, как твердость и цвет, химические элементы и изотопы, кристаллическую структуру и внешний вид минералов.

Я тоже когда-то твердо придерживался двухвековой традиции. Первые двадцать лет своей научной деятельности я выделял идеальные миниатюрные кристаллы обычных породообразующих минералов, подвергал их невообразимому давлению между двумя алмазными наковальнями, обрабатывал сплющенные образцы рентгеновскими лучами, а потом измерял мельчайшие изменения в их атомной структуре. Мы с коллегами игнорировали геологическое время и географическое место, поскольку не интересовались ни возрастом, ни происхождением наших микроскопических образцов. Мы называли себя минералогами-физиками и держались в компании таких внеисторических наук, как химия и физика. Не от них ли мы восприняли предвзятые мнения о геологических «сказках»?

Такой образ мыслей в минералогии коренится в ее происхождении от горного дела и химии, слегка приправленных подсознательным убеждением в том, что физика и химия являются более строгими и точными науками, чем творческие, направленные на качественные характеристики «байки» геологов. (Исследователи истории Земли часто задумываются, не это ли предубеждение лежит в основе того, что среди лауреатов Нобелевской премии много физиков и химиков, но ни одного геолога.) Поэтому мало кто из минералогов интересуется удивительными превращениями приповерхностных минералов во времени. Когда в 2008 г. мы с коллегами опубликовали коллективную статью под названием «Минеральная эволюция», наша цель заключалась в том, чтобы оспорить традиционный подход — и преобразовать минералогию в историческую науку. Наша ставка на минералогическое прошлое Земли, а также других планет Солнечной системы и планет за ее пределами

основывается на том, что минеральный состав Земли эволюционирует, проходя несколько последовательных ступеней, на каждой из которых наблюдаются разнообразные изменения в составе и распределении минералов. Отсюда и повествовательный уклон этой книги, в которой планеты прогрессируют от минералогической простоты к сложности, от какой-нибудь дюжины минеральных веществ в составе газа и пыли, из которых образовалась Солнечная система, до более сорока пяти сотен разновидностей минералов, существующих на Земле в наше время, две трети из которых не смогли бы появиться в неорганическом мире.

Это была узкопрофильная статья, опубликованная в специализированном журнале *American Mineralogist*, который читали в основном профессионалы. Но международная пресса быстро подхватила гипотезу о том, что жизнь и минералы развивались взаимосвязанно. Журналы *The Economist* и *Der Spiegel*, *Science* и *Nature*, а также несколько научно-популярных изданий ухватились за наши научные догадки о происхождении и развитии минералогического многообразия Земли. Журнал *The New Scientist* даже опубликовал остроумную карикатуру, изображающую четыре стадии минеральной эволюции: от кристалла с плавниками до «развитого» кристалла с тросточкой. Никому из них не пришло в голову, что все наши выкладки носят исключительно теоретический, умозрительный характер. Действительно ли на Марсе существует только 500 разновидностей минералов? Действительно ли неорганический мир неспособен создать более 1500 разновидностей? Действительно ли потребовался живой, насыщенный кислородом мир, чтобы на Земле утроилось количество видов минералов? Мы представили эти тезисы как гипотезы; их еще предстояло доказать.

Кто мог тогда предвидеть, что самым продуктивным источником доказательств окажутся породы «скучного миллиарда»?

Чтобы облечь количественной плотью голый костяк эволюционной гипотезы, надо было исследовать отдельные группы

минералов. И вот я связался с Эдом Гру, профессором-исследователем в области наук о Земле из Университета Мэна. Эд, выносливый и упорный исследователь, посвятил свою жизнь тщательному изучению минералов, в состав которых входят бериллий и бор — редкие элементы, которые время от времени концентрируются в крупные, красивые кристаллы. Он знает все 108 официально зарегистрированных минералов, в состав которых входит бериллий, как собственных друзей. У каждого из них свой характер, каждый играет свою геологическую роль. Я попросил его воссоздать их описание во времени. Когда они появились? Какие процессы привели к увеличению их разновидностей? «Вымерли» ли какие-то из минералов с бериллием? Никто до сих пор не пытался ответить на эти вопросы. Трудно даже просто фиксировать в каталоге все возможные минералы с данным элементом, но уточнять, когда какой-либо из образцов появился или исчез, вообще неподъемная задача. Существует множество мест, где встречается самый распространенный из бериллиевых минералов — берилл (особенно ценится его темно-зеленая разновидность — изумруд). Страшно даже попытаться проследить месторождение древнейшего из них.

После целого года тяжелейшего труда Эд Гру построил примерную диаграмму, показывающую совокупное количество всех бериллиевых минералов на временно́й шкале, на основе тысяч известных находок. Как и ожидалось, потребовалось длительное время для появления первого берилла — почти 1,5 млрд лет. В земной коре бериллий присутствует в отношении два на миллион, так что проходит много времени, прежде чем бериллий попадет в обогащенную жидкую среду, где осядут кристаллы берилла. В течение следующего миллиарда лет появилось всего лишь около двадцати разновидностей бериллиевых минералов. Согласно нашей новорожденной теории, всплеск образования новых минералов должен был прийтись на период Великого кислородного события, между 2,4 и 2,0 млрд лет назад, но Эд обнаружил нечто иное. Наивысший прирост минералов случился несколько позднее, когда между 1,8 и 1,7 млрд лет назад количество разновидностей минера-

лов увеличилось больше чем в два раза. Этот промежуток времени, как раз в самом начале «скучного» миллиарда, был периодом сборки суперконтинента Колумбия. Возможно, бериллий накапливался в новых минералах в процессе интенсивного горообразования, вызванного столкновением континентов.

Вслед за бериллием Эд Гру предпринял еще более впечатляющее исследование 263 разновидностей минералов бора. Самая известная красно-зеленая разновидность полудрагоценного турмалина обнаруживается в древнейших на Земле породах, но возраст их не превышает полумиллиарда лет. В образцах давностью 2,5 млрд лет можно встретить едва ли двадцать разновидностей минералов с бором — менее 10% от современного количества. Как и в случае с бериллием, Эд обнаружил удвоение численности различных бористых минералов в породах времен «скучного» миллиарда, на сей раз в промежутке между 2,1 и 1,7 млрд лет назад, т. е. от начала до конца существования Колумбии. И вновь этот интенсивный прирост разновидностей минералов вызывает множество вопросов — о том, когда именно после Великого кислородного события произошло увеличение разновидностей минералов, когда и как собирались суперконтиненты, почему минералогические новшества пришлись именно на «скучный миллиард».

Следующий набег на истоки минеральной эволюции мы совершили, выбрав 90 известных минералов, содержащих редкий элемент ртуть, — и это исследование еще более осложнило картину. Подобно гораздо более распространенному элементу — железу, ртуть встречается в трех химических состояниях: как богатый электронами металл (знакомая серебристая жидкость в старых термометрах), а также в виде двух окислов. Таким образом, мы ожидали встретить всплеск интенсивного увеличения разновидностей ртутных минералов вслед за Великим кислородным событием, но открылась совершенно иная картина. Как и в истории бериллия и бора, потребовалось более миллиарда лет для появления древнейшего ртутного минерала — самой распространенной ртутной породы, ярко-красной киновари. Остальные разновидности следовали импульсами: примерно

дюжина новых ртутных минералов возникла во время сборки Кенорленда; потом были полмиллиарда лет застоя; потом еще полдюжины новообразований появилось в период сборки Колумбии. Очевидно, при столкновении континентов процесс горообразования сопровождается высвобождением потока минерализующих жидкостных сред, где и зарождаются новые минералы. Открытие того, что такая минерализация приходилась строго на промежутки между формированием суперконтинентов, оказалось большим сюрпризом.

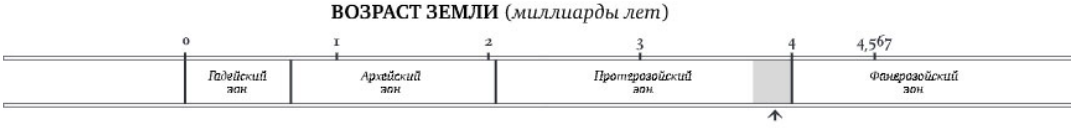
Затем последовало еще одно удивительное открытие: в течение длительного времени (от 1,8 млрд до 600 млн лет назад — дольше самого «скучного» миллиарда) не происходило ничего. Даже в период сборки суперконтинента Родиния, миллиард лет назад, не появилось ни единого нового ртутного минерала. Мы заподозрили, что виноват в этом насыщенный серой, промежуточный океан. Киноварь, сульфид ртути, является наименее растворимым из всех пород. Каждый атом ртути, попавший в древние сернистые моря, тут же взаимодействовал с серой, образуя микроскопические частицы киновари, которые медленно оседали на дно, прекращая дальнейшую минерализацию ртути. И только в последние 600 млн лет, когда вода в океанах насытилась кислородом, а на суше укрепилась живая природа, произошла взрывная минерализация ртути.

Загадки

Итак, явилось ли взрывообразное появление новых минералов следствием цикла сборки суперконтинента, характерного для «скучного» миллиарда? Стало ли это замедленной реакцией на распространение кислорода? Что касается ртути: исчерпывается ли история появления ртутных минералов гипотезой связанной с сернистым океаном? Какие еще открытия преподнесет исследование других пятидесяти с лишним минералообразующих элементов? Ясно, что нам предстоит еще многое узнать — ведь мы только-только обратились к богатым подробностям истории «скучного» миллиарда.

Этот малоизученный промежуток времени, от 1,85 млрд до 850 млн лет назад, точно так же отмечен постоянными переменами, которые характерны для каждой стадии эволюции нашей планеты. К периоду, начавшемуся 850 млн лет назад, приповерхностная среда Земли необратимо изменилась. Постоянно обогащавшийся кислородом океан у берегов изобиловал водорослями и микроорганизмами, включая зловонные серные бактерии, а тем временем на суше развивалась своя жизнь. Как бы то ни было, загадочный, не столь уж скучный миллиард показывает нам, что Земля время от времени переживает застой — приводя в равновесие многочисленные противоборствующие силы. Силы тяготения и поток тепловой энергии, сера и кислород, вода и живое вещество удерживаются в равновесии в течение сотен миллионов лет. Но всегда есть какое-нибудь «но». Стоит только одной из этих сил слегка измениться, как Земля выходит из состояния равновесия, достигая переломного момента, последствия которого невозможно предугадать — происходят стремительные перемены, которые могут разрушить приповерхностную среду.

Что впоследствии и случилось.



Глава 9

Белая Земля

Цикл Земля — снежный шар — Земля-парник

Возраст Земли: от 3,7 до 4,0 млрд лет

Протерозойский эон, промежуток, равный почти половине истории Земли — от 2,5 млрд до 542 млн лет назад, стал длительным периодом резких контрастов. Весьма интересны первые 500 млн лет, на которые пришелся расцвет фотосинтезирующих водорослей, когда происходило последовательное нарастание кислорода в атмосфере, накопление толщ железистых кварцитов в богатых железом океанах и появление эукариотных организмов, у которых ДНК сосредоточивалась в ядре клеток, ставших предшественниками всех растений и животных.

На середину протерозойской эпохи пришелся так называемый «скучный» миллиард — самый трудолюбивый и самый зловонный период. В противоположность ему последние 300 млн лет были, пожалуй, наиболее динамичными за всю эпоху, когда собирались и раскалывались континенты, резко менялся климат, происходили колоссальные сдвиги в химическом составе океанской воды и атмосферы, а также появились животные.

Надеюсь, я достаточно отчетливо выразил свою позицию: все системы на Земле взаимосвязаны самым сложным обра-

зом. Воздух, вода и почва представляются нам отдельными средами, которые меняются по-разному и в разное время. Погода меняется ежедневно; океаны меняются тысячелетиями; цикл горообразования продолжается миллионы лет; требуются сотни миллионов лет на сборку и раскалывание суперконтинентов. И все же каждая из земных систем воздействует на все остальные как очевидным, так и неявным образом.

Нашу планету можно метафорически уподобить дому, и эта метафора столь же полезна, сколь несовершенна. Покупая дом, мы стремимся узнать о нем как можно больше: когда он построен, когда и каким перестройкам подвергался и что к нему пристроили. Нам хочется подробнее выяснить, характер строительных материалов и устройство дома, от фундамента до крыши. Нам необходимо проверить водопровод и источники воды, а также вентиляционно-отопительную систему — обогреватели, кондиционеры и источники энергии для них. Предусмотрительный покупатель дома не забудет поинтересоваться потенциальным риском и ущербом от пожара и угарного газа, термитов и древесных жучков, радона и асбеста, протечек и плесени. Так и геологи изучают происхождение Земли, ее основные превращения, природу горных пород и минералов, движение воды и воздуха, источники энергии и геологические опасности.

Дом ведет себя подобно Земле, ее сложным взаимосвязям, которые проявляются порой удивительным и неожиданным образом, проходя циклы как с положительной, так и с отрицательной обратной связью. В холодный зимний день, когда мы ощущаем дискомфорт от низкой температуры, срабатывает термостат, включая обогреватель, — и воздух в доме нагревается. Как только дом прогреется, обогреватель отключается. В жаркие летние дни подобным же образом ведет себя кондиционер, который включается, когда температура поднимается слишком высоко. Земля тоже использует циклы отрицательной обратной связи, что позволяет планете поддерживать более или менее устойчивый температурный режим, влажность и состав приповерхностной среды. Например, стоит океану слишком нагреться, как появляются тучи, отражая солнечную

энергию и тем самым позволяя воде охладиться. Повышенное содержание в атмосфере углекислого газа вызывает глобальное потепление, ускоряющее процессы выветривания горных пород, что, в свою очередь, приводит к постепенному поглощению избытков углекислого газа, и в результате атмосфера снова охлаждается.

Иногда в домах усиливается положительная обратная связь, что может сопровождаться нежелательными последствиями. В холодный зимний день ваша отопительная система выходит из строя, могут замерзнуть и лопнуть трубы, затопляя дом холодной водой, отчего в доме становится еще холоднее и неуютнее. Многие колебания современного климата суть не что иное, как положительная обратная связь с ее нежелательными последствиями. Подъем уровня воды в океане приводит к затоплению побережья, что может привести к большему испарению и более интенсивному выпадению осадков, что, в свою очередь, ведет к еще большему затоплению побережья. Потепление воды вызывает обширное таяние метаносодержащих льдов на и под дном океана, отчего парниковый газ метан поднимается в атмосферу и вызывает еще большее потепление, что может вызвать увеличение содержания метана в атмосфере. Стоит только взглянуть на последствия парникового эффекта на планете-сестре Венере, где образовалась плотная углекислая атмосфера с температурой на поверхности планеты порядка 500 °C, чтобы представить себе возможные катастрофические последствия неуправляемой позитивной обратной связи.

«Скучный» миллиард, если его вообще стоит считать скучным, был следствием многих плодотворных эффектов отрицательной обратной связи, благодаря чему изменения удерживались под контролем. Несмотря на перемещение континентов в глобальном масштабе и суперконтинентальные циклы в течение всего этого долгого периода, климат на планете, по-видимому, оставался стабильным. Великих оледенений не происходило. Химический состав бескислородного, сернистого океана практически не менялся; жизнь развивалась

без каких-либо резких скачков. Появлялись новые разновидности минералов, но не было каких-то драматических событий в бытие воздуха, суши или моря.

Все изменения произошли после раскола Родинии.

Разделение

Разительный контраст с загадочно спокойным промежутком времени — от 1,85 млрд до 850 млн лет назад — составили следующие за ним несколько сот миллионов лет, когда произошли самые стремительные и чрезвычайные в истории Земли флуктуации в приповерхностной области. Около 850 млн лет назад большая часть земной суши была все еще собрана поблизости от экватора в засушливый и абсолютно безжизненный суперконтинент Родиния. Необъятный океан Мировия, над которым кое-где возвышались небольшие вулканические островки, окружал со всех сторон этот голый, ржаво-красный мегаконтинент. Негостеприимная атмосфера содержала ничтожное, по нынешним меркам, количество кислорода, явно недостаточное для образования сколь-нибудь значительного озонового слоя, который мог бы обеспечить защиту от ультрафиолетового излучения. Путешественник во времени, снабженный запасом кислорода и солнцезащитного крема, мог бы выжить на побережье, питаясь исключительно водорослями, но жизнь не показалась бы ему приятным пикником в этом пустынном мире неопротерозоя.

Неравновесное противостояние Родинии и океана не могло продолжаться бесконечно. Большую часть земной истории климат на планете поддерживался на умеренном уровне за счет отрицательной обратной связи. Разумеется, перемены климата имели место, но колебания редко достигали крайней степени, которая угрожала бы жизни. Однако около 850 млн лет назад начались изменения, нарушившие более или менее устойчивое равновесие и приведшие к переломному моменту в истории планеты. Самым важным из этих изменений было медленное и постепенное раскалывание экваториальной Роди-

нии. Первая трещина возникла 850 млн лет назад и была сравнительно небольшой: кратоны Конго и Калахари (ныне части Южной Африки) начали отрываться к юго-востоку от остального, пока еще целого суперконтинента. Около 800 млн лет назад новая небольшая трещина откололa Западно-Африканский кратон, который двинулся на юг от материка; 750 млн лет назад распад Родинии шел уже полным ходом, и в это же время земную кору изрезали трещины, сопровождавшиеся извержением вулканов и потоками базальтовой лавы. Суперконтинент раскололся пополам с севера на юг, и на запад двинулся Ур, а на восток — Лаврентия, Балтика, Амазония и скопление кратонов помельче.

Раскалывание суперконтинента создало новую береговую линию на тысячи километров и вызвало стремительный размыв побережья. В межкратонных водах формировались динамичные осадочные бассейны, что обозначило конец длительному застою в истории горных пород Земли — паузе в отложении осадочных пород, которая началась в мезопротерозойскую эпоху и длилась почти четверть миллиарда лет. В новом подвижном, меняющемся мире процветали микроорганизмы. Размывание суши поставляло минеральный корм для водорослей, которые долго держались на скудном питании, состоявшем из небольших запасов фосфатов, молибдена, марганца и других основных элементов. Палеонтологи говорят о времени песчаных шельфов приливных зон, покрытых толстыми слоями скользких зеленых нитчатых бактерий, и об открытой воде, по которой плавали груды зловонных водорослей.

Под воздействием тектонических процессов менялись океаны, атмосфера и климат. Росло содержание кислорода в атмосфере за счет буйного роста прибрежных водорослей, а также за счет того, что увеличение биомассы водорослей вело к стремительному связыванию — погребению в осадках органического углерода. На протяжении всей земной истории богатая углеродом биомасса является главным потребителем кислорода. Чем больше гниющей биомассы, тем быстрее расходуется кислород. (Лесные пожары представляют собой чрезвычайно

ускоренный вариант такого процесса поглощения кислорода.) По той же причине чем быстрее захороняется в осадках углеродосодержащая биомасса, тем активнее возрастает уровень кислорода в атмосфере. Но откуда нам известно, что биомасса погребалась? Оказывается, красноречивая запись этого процесса содержится в известняке, слои которого образуются в результате постепенного оседания на мелководное дно океана углеродистых минеральных веществ.

Изотопы углерода в известняке указывают на изменения скорости воспроизводства водорослей. Важнейшие химические реакции в органическом веществе — например, превращение воды и углекислого газа в сахарозу в процессе фотосинтеза — всегда накапливают изотоп углерода-12, более легкий по сравнению с углеродом-13. Поэтому углерод, содержащийся в биомассе (в живых и мертвых водорослях), отличается наличием более легких изотопов по сравнению с неорганическим углеродом, входящим в состав известняка. В обычные времена, когда процветают микроорганизмы, а легкий углерод берется из океанской воды, известняк отличается большим содержанием тяжелого углерода. Но во времена необычно интенсивного захоронения биомассы, когда легкий углерод в еще большем количестве систематически изымается из океанской воды, остатки углерода в составе известняка в среднем становятся тяжелее. Действительно, известняк, отложившийся вдоль берегов Родинии от 790 до 740 млн лет назад, отличается необычайной тяжестью. Должно быть, в этот период водоросли разрастались и захоронялись с небывалой скоростью.

Такой невиданный расцвет жизни оказал значительное воздействие на климат Земли. Микроорганизмы поглощают углекислый газ, который постоянно выбрасывается в атмосферу действующими вулканами. В обычные времена обмен углекислого газа в атмосфере сбалансирован и остается относительно стабильным, но стремительный рост водорослей в эпоху неопротерозойской активности способствовал падению уровня углекислого газа в атмосфере, что, в свою очередь, ослабляло парниковый эффект. Такая обратная связь с содержанием угле-

кислого газа, возможно, ускоряла остывание Земли. Раскалывание Родинии значительно увеличило количество подводных вулканов, формировавших раскаленную кору пониженной плотности на дне океана. Плавучая кора усилила обмеление океанов по сравнению с предыдущими периодами и подняла соответственно уровень моря. Отсюда можно сделать вывод, что начиная с 750 млн назад образовалось много внутренних морей. Появление большого количества внутренних морей привело к увеличению испарения воды и количества осадков, результатом чего стало ускорение эрозии горных пород, выходящих на поверхность. Этот процесс сопровождался усиленным поглощением углекислого газа, а снижение уровня углекислого газа, в свою очередь, привело к глобальному похолоданию.

Дополнительную роль в изменении климата на планете сыграло и расположение континентов и океанов до и во время раскалывания Родинии. Вода и суша разительно отличаются друг от друга по альбедо — способности отражать солнечные лучи. Темный океан отличается низким альбедо; он поглощает большую часть солнечной энергии и при этом теплеет. Сухая, бесплодная суша по большей части, напротив, отражает солнечные лучи. Засушливый, пустынный континент вроде Родинии отражает солнечный свет, возвращая его в космическое пространство. Такое соотношение полярных океанов и экваториальных континентов способствовало глобальному похолоданию, поскольку экватор получал больше солнечной энергии, чем полюса.

Эти глобальные процессы и сложные обратные связи в какой-то мере сохраняются и сегодня, но совершенно очевидно, что в эпоху неопротерозоя Земля после длительного периода относительной стабильности подверглась значительным изменениям.

Земля-снежок — Земля-парник

Три четверти миллиарда лет назад Земля вошла в период нестабильности климата, невиданной ни до того, ни после. Началось все с сурового ледникового периода.

Ледники наложили несомненный отпечаток на осадочные породы. Прежде всего это толстые неровные слои характерных пород, именуемых тиллитами, сохранивших хаотическое смешение песка, гравия, грубообломочных фрагментов горных пород, равно как и очень тонкую пыль. Ледники также оставили после себя выглаженные обнажения коренных пород, исцарапанных и отполированных медленно ползущими пластами льда. Помимо беспорядочно разбросанных валунов и бугристых морен дополняют перечень доказательств оледенения варвиты — тонкослоистые отложения, образующиеся в результате сезонного поступления осадка в приледниковые озера.

По всему миру, почти всюду, где бы ни искали, полевые геологи обнаруживали признаки ледниковых отложений возрастом между 740 и 580 млн лет. Данные о резком изменении климата около 740 млн лет назад уже накапливались десятилетиями, когда Пол Хоффман в соавторстве с тремя коллегами из Гарварда и Университета Миннесоты опубликовал короткую, но возбудившую всеобщий интерес статью «Ледяная Земля в эпоху неопротерозоя» (*Science*, 28 августа 1998 г.). Хоффман с соавторами сформулировал весьма прогрессивную идею: за этот период Земля не просто дважды пережила оледенение, но и покрывалась льдом полностью, от полюсов до экватора. Их точка зрения основывалась на тщательных полевых исследованиях целого ряда разрезов осадочных толщ в районе Берега Скелетов в Намибии: мощные ледниковые тиллиты и палеомагнитные данные из них свидетельствуют о том, что ледники почти достигали экватора, доходя примерно до 12° широты. И это не были горные ледники, венчающие вершины: тиллиты накапливались в заведомо прибрежно-морских мелководных условиях, на уровне моря. Это означает, что климат вблизи экватора был очень холодный. По сравнению с ним в эпоху последнего ледникового периода ледники не продвигались южнее 45° северной широты, а характер окаменелостей указывает на наличие сравнительно теплой тропической зоны даже в самый пик оледенения. Гарвардская команда представила неопровержимые доказательства присутствия неопроте-

розойских ледников на уровне моря вблизи экватора. Следовательно, ледяной покров окутывал всю Землю.

Для многих читателей статьи Хоффмана 1998 г. неопровержимым доказательством внезапного и катастрофического изменения климата Земли послужили изотопы углерода. Миллионы лет до предположительного первого ледникового периода — т. е. более чем 740 млн лет назад — стремительный рост водорослевой биомассы способствовал накоплению легких изотопов углерода. Известняки, сформировавшиеся в это время в прибрежных водах вокруг распадавшейся Родинии, отличались наличием тяжелого углерода. Но если рост микроорганизмов замедляется или прекращается, в известняке должны появиться легкие изотопы углерода. Именно это и обнаружил Хоффман с коллегами: снижение доли тяжелого углерода более чем на 1% непосредственно перед и сразу после появления ледниковых отложений около 700 млн лет назад.

На основе этого и была построена теория о том, что циклы положительной обратной связи обусловили все большее и большее похолодание на планете. Один из таких циклов зависел от континентального выветривания — процесса, характерного для теплых и влажных тропических зон, когда атмосфера теряет все больше и больше CO_2. Другая обратная связь возникла, когда массовое произрастание водорослей забрало еще больше углекислого газа из воздуха. Пока парниковый эффект на планете ослаблялся и атмосфера охлаждалась, на полюсах начали формироваться и расти ледники. Эти белые ледяные покровы отражали солнечные лучи, создавая положительную обратную связь, в результате чего Земля охлаждалась все быстрее. По мере того как ледяной покров распространялся на более низкие широты, пока еще теплый экваториальный континент и плодородные водорослевые экосистемы продолжали поглощать углекислый газ из атмосферы во все большем количестве. Постепенно рушился климатический баланс планеты, достигнув критической точки, когда ледники с обоих полюсов придвинулись вплотную к экватору, угрожая полностью покрыть Землю льдом. Согласно самому неблагоприятному сценарию,

выдвинутому Полом Хоффманом и его коллегами, Земля превратилась в сплошной «снежный ком», т. е. средняя температура на планете опустилась до –45 °С, а ледяной покров вырос до 1,5 км толщиной, полностью накрыв планету.

В течение миллионов лет Земля была покрыта льдом (или в лучшем случае снежной слякотью). Планета — «снежный ком» не могла поглощать солнечные лучи и, казалось, была обречена навеки остаться в ледяном коконе, поскольку температура постоянно сохранялась ниже нуля. Глобальное оледенение остановило развитие почти всех экосистем. Когда-то обильная микроорганизмами жизнь оказалась на грани полного исчезновения. Держались только самые выносливые и закаленные бактерии, которым удавалось выживать в течение миллиардов лет в абсолютной темноте на дне Мирового океана благодаря гидротермальным источникам. Другие островки жизни состояли из фотосинтезирующих водорослей, прижившихся в доступных солнечным лучам мелководных пространствах открытой воды, покрытой битым льдом, вблизи вулканических зон.

Как вообще удалось оправиться планете после глобальной, долгой и холодной зимы? Ответ следует искать в глубоких неумолимых процессах. Белоснежный ледяной панцирь не мог состязаться с глобальным движением тектонических плит; не мог он и противостоять бесконечным выбросам вулканических газов из сотен черных кратеров, выступавших над поверхностью льда. Двуокись углерода, основной вулканический газ, вновь начал заполнять атмосферу. Поскольку Земля была окутана ледяным покровом, процесс поглощения углекислого газа в ходе выветривания горных пород и фотосинтеза почти прекратился. Объем углекислого газа постепенно возрос до величин, невиданных уже более миллиарда лет, в несколько сотен раз превысив современный уровень CO_2 в атмосфере, запустив новый цикл положительной обратной связи — пропавший было парниковый эффект. Солнечные лучи все еще рассеивались, отражаясь от ледяного покрова, но углекислый газ

в атмосфере отбрасывал солнечную энергию обратно к поверхности, неуклонно нагревая планету.

Прогревание атмосферы вызвало таяние льда в экваториальной зоне впервые за много миллионов лет. Обнажившаяся темная почва поглощала солнечные лучи, тем самым ускоряя прогревание. По мере усиления положительной обратной связи между Солнцем и поверхностью Земли океаны также начали освобождаться от ледяного покрова. Земля становилась все теплее и теплее.

Дело о газе

Многие ученые в настоящее время полагают, что существует еще одна положительная обратная связь — механизм, и в наши дни играющий важную роль, который мог усугубить процесс стремительного потепления. Метан, простейшее углеводородное топливо, которое мы используем в домах в качестве бытового газа, является также и парниковым газом, причем таким, который гораздо эффективнее, чем углекислый газ, запирает солнечную энергию на Земле. Миллиарды лет метан накапливался в отложениях на дне океана, возможно, за счет двух противоположных механизмов. Первый достаточно хорошо изучен и потому не вызывает возражений, он представляет собой естественный метаболизм микроорганизмов, в ходе которого высвобождается метан. Эти производители метана благоденствуют в бескислородной среде придонных отложений, рядом с которыми и содержатся основные известные запасы метана, так что главные месторождения природного газа, как представляется, возникли в результате жизнедеятельности микроорганизмов.

Недавние исследования выявили еще один возможный источник метана на большей глубине — источник, вообще не относящийся к биологическим процессам. Некоторые исследователи предположили, что в глубоких слоях коры и верхних слоях мантии, на глубине многих сотен километров, где преобладают экстремальные температуры и высокое давление, вода и углекислый газ могут вступать в реакцию с обычными

железосодержащими минералами, в результате чего образуется метан. С целью воспроизвести эти реакции были проведены опыты с использованием высокой температуры и давления. Часто ссылаются на исследование, проведенное в Геофизической лаборатории Института Карнеги в 2004 г. молодым ученым Генри Скоттом, который смешал с водой два распространенных в коре минерала: кальцит (карбонат кальция — углеродосодержащий известняк) и окись железа. Скотт поместил эту смесь в алмазную камеру высокого давления и нагрел с помощью лазера до температуры свыше 1000 °C — именно такие экстремальные условия присущи верхним слоям мантии. Напомню, что преимущество алмазной камеры заключается в ее прозрачности, благодаря которой исследователь может наблюдать за тем, что происходит с образцом. Генри Скотт наблюдал за тем, как в камере образуются пузырьки метана. Водород в составе воды вступил в реакцию с углеродом из кальцита, в результате чего образовался природный газ. Многие подобные опыты, проведенные в России, Японии и Канаде, выявили аналогичный синтез углеводородов в условиях, подобных тем, что существуют в недрах Земли.

Эти эксперименты важны также для представления о глобальном потеплении в эпоху неопротерозоя, поскольку именно метан мог сыграть тогда важную роль в формировании положительной обратной связи. Большая часть метана, накопившаяся в придонных зонах океана, содержится в удивительном соединении, называемом газовым гидратом, — похожей на кристаллики льда смеси воды и газа, которая обнаруживается в обнажениях на континентальном склоне в океанах. (Застывший метановый лед на самом деле горит очень ярким пламенем — это можно увидеть на видеороликах в Интернете.) Огромные запасы метана — по некоторым оценкам, во много раз превышающие совокупный объем природного газа в известных месторождениях — заключены в этих метановых льдах, которые образуются, когда газ, выходящий из земных недр, взаимодействует с холодной морской водой. Значительные запасы метанового льда содержатся в арктической вечной

мерзлоте — в почвах Сибири, Северной Канады и других регионов, которые в течение тысячелетий пребывают в замороженном состоянии.

Сильная положительная климатическая обратная связь могла образоваться, когда хотя бы немного прогрелась вода в океане, что вызвало таяние мелководных залежей газового гидрата и соответственно обильный выброс газообразного метана в атмосферу. Метан значительно усиливает парниковый эффект, отчего океан нагревается еще быстрее. Современные ученые говорят о катастрофическом выбросе придонного метана в атмосферу во времена неопротерозоя как об условии ускорения глобального потепления, когда Земля от ледяной стужи перешла к жаре в течение всего каких-то десятилетий.

Такой неопротерозойский сценарий сильно зависит от основного источника метана. Если большую часть природного газа в океане производят микроорганизмы, то образование газового гидрата наверняка замедлялось во времена оледенения, и в таком случае метан вряд ли играл бы существенную роль в глобальном потеплении. Если же значительный объем метана поднимается к поверхности от раскаленных, испытывающих высокое давление слоев мантии, тогда запасы твердого метана постоянно пополнялись даже во время глобального похолодания и не зависели от жизнедеятельности микроорганизмов, запуская грандиозную обратную связь. Так что же является источником метана — земные недра, шельфовые микроорганизмы или и то и другое вместе?

Вопрос, какая из теорий происхождения метана верна, может показаться непринципиальным, однако он вызывает давнюю, иногда острую международную полемику в нефтегазовой отрасли. Нефть образуется в основном из молекул углеводородов, среди которых метан является самым простым и наиболее распространенным. Принято считать, что все естественные процессы образования метана играют определенную роль и в формировании нефти.

Одну из этих точек зрения поддерживает русско-украинская школа, основанная в середине XIX в. известным русским уче-

ным-химиком Дмитрием Менделеевым, разработавшим универсальную периодическую таблицу элементов. Менделеев доказывал небиогенное происхождение нефти еще до того, как были проведены эксперименты, подтвердившие его идеи. «Следует обратить внимание, — писал он, — на тот знаменательный факт, что нефть зародилась в недрах Земли, а потому именно там и следует искать ее источники». Во второй половине XX в. идеи Менделеева получили второе рождение в России и Украине, и они возвестили процветание российской нефтегазовой отрасли. Некоторые геохимики в России до сих пор отстаивают точку зрения, что практически вся нефть и природный газ имеют глубинные неорганические источники. По их мнению, многие нефтяные месторождения являются возобновляемыми ресурсами, которые постоянно пополняются из гигантских резервуаров, расположенных в глубине мантии.

Это мнение представляется научной ересью для большинства американских нефтяников-геологов, которые ссылаются на внушительный перечень доказательств, подтверждающих исключительно органическое происхождение нефти: нефть обнаруживается лишь в осадочных слоях, где некогда бурно развивалась жизнь; нефть содержит множество молекулярных признаков ее органической природы; изотопный состав нефти очень похож на биологический; микроэлементы, входящие в ее состав, также указывают на биогенез. Большинство американских нефтяников не сомневаются: практически вся нефть и природный газ имеют органическое происхождение.

Эта полемика, десятилетиями подогреваемая русско-американским соперничеством, вновь оживилась в Северной Америке под влиянием блестящего австрийского астрофизика, задиристого и честолюбивого Томаса (Томми) Голда, преподававшего в Корнеллском университете до своей безвременной кончины в 2004 г. Главная заявка Голда на научное признание, по крайней мере в рамках избранной специальности — астрофизики, состояла в открытии того, что равномерные радиоимпульсы из глубокого космоса, так называемые пульсары, на самом деле представляют собой стремительно вращающи-

еся нейтронные звезды. (Одно время некоторые астрономы считали, что эти радиосигналы исходят от отдаленных инопланетных цивилизаций, отсюда и астрономическое обозначение первых пульсаров — LGM, аббревиатура от Little Green Men.)

Хотя Голд интересовался многими научными проблемами, от психологии слуха до состава пыли, покрывающей поверхность Луны, его самым значительным достижением, помимо астрофизики, стала поддержка идеи неорганического происхождения нефти и природного газа. Он доказывал, что нефть кажется органическим веществом просто потому, что колонии микроорганизмов — «глубинная биосфера» — используют неорганические углеводороды в качестве питания. Таким образом, микроорганизмы накладывают на неорганические углеводороды свой биохимический отпечаток — гопаны, липиды и т. п. На основе этой гипотезы Голд рекомендовал искать углеводороды в непривычных средах вроде вулканических и метаморфических пород. Он даже убедил одну шведскую фирму пробурить пробную скважину в таких твердых породах, и этот проект дал любопытные, хотя и сомнительные, результаты (а несчастным инвесторам стоил кучи денег).

Если внимательно прислушаться к обеим сторонам, становится очевидно, что ответ на вопрос о происхождении углеводородов далеко неоднозначен. Томми Голд был бесконечно любознателен и страстно искал ответы. Незадолго до своей безвременной кончины он посетил нашу лабораторию, прочитал лекцию о глубинной биосфере и обсудил возможность сотрудничества: постановки экспериментов, которые могли бы помочь в решении этого вопроса. Спорная проблема происхождения метана до сих пор не разрешена, хотя это не означает, что она неразрешима. Для выяснения природы глубинного углерода необходимо международное сотрудничество.

Обсерватория глубинного углерода

Углерод, пожалуй, следует считать важнейшим элементом на Земле. Углерод — это ключ к пониманию изменений кли-

мата и окружающей среды. Углерод с давних пор является важнейшим источником энергии. Углерод — решающий элемент для развития жизни и к тому же основной элемент в разработке новых лекарственных препаратов и другой продукции. Нам необходимо лучше узнать углерод, причем не только его поверхностные проявления в океане, атмосфере, горных породах и живых организмах, но и саму его суть.

В 2009 г. Фонд Альфреда Слоуна совместно с Геофизической лабораторией запустил проект Обсерватории глубинного углерода (DCO), грандиозную, рассчитанную на десять лет программу исследования углерода в масштабах планеты, особенно его химической и биологической роли в недрах Земли. Где располагается углерод? Насколько велики его ресурсы? Как он перемещается к поверхности и от нее? Насколько распространена глубинная биосфера? Этот междисциплинарный и международный проект уже привлек сотни исследователей из десятков стран. Цели у нас самые разные: от составления глобального реестра глубинных микроорганизмов до мониторинга выбросов углекислого газа из всех действующих на планете вулканов. Но самой главной задачей DCO является выяснение происхождения углеводородов, от метана до нефти. Геохимик Эд Янг и его коллега Эдвин Шойбле, оба из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, считают, что изотопы могут послужить ключом, который поможет выяснить, что является источником просачивающегося метана на дне океана — минералы или микроорганизмы. Но их теоретические выкладки не могут быть проверены путем простого сопоставления тяжелых и легких изотопов. Эд Янг намерен измерить изотопологи.

Изотопологи — это химически идентичные молекулы, которые различаются только по составу изотопов. Метан, состоящий из одного атома углерода и четырех атомов водорода, существует в виде целого ряда изотопологов. Примерно 99,8% всех атомов углерода являются более легкой разновидностью углерода — углеродом-12, но на каждые пятьсот атомов приходится один тяжелый изотоп углерода-13. Аналогично водород

обычно бывает представлен легким вариантом (строго говоря, это водород-1, но его обычно называют просто водород), но существует также и более тяжелый изотоп — водород-2, который обычно называют дейтерием. Соотношение водорода и дейтерия на Земле примерно равно тысяча к одному. Эти пропорции означают, что одна из каждых пятисот молекул метана содержит изотоп углерода-13, а примерно четыре из каждой тысячи молекул метана содержат дейтерий.

Следовые количества каждого из двух тяжелых изотопов довольно трудно измерять, но Эд Янг с коллегами охотятся вовсе не за ними. Они намереваются измерить неуловимые, дважды замещенные изотопологи метана — примерно одну молекулу метана на миллион, которая содержит либо одновременно углерод-13 и дейтерий (обозначаемую $^{13}CH_3D$), либо два дейтерия ($^{12}CH_2D_2$). По подсчетам Эдвина Шойбле, соотношение этих двух редких изотопологов в каждом отдельно взятом образце метана может служить чувствительным индикатором температуры, при которой формировался метан. Все дело именно в температуре: если данный метан образовался при температуре ниже 100 °C, то это свидетельствует о его органическом происхождении; если он формировался при температуре выше 500 °C, то он, вероятнее всего, неорганический.

На бумаге этот замысел выглядит замечательно. Однако проблема в том, что в мире не существует прибора, способного измерить соотношение между $^{13}CH_3D$ и $^{12}CH_2D_2$. Обычный изотопный анализ проводится на масс-спектрометре, измеряющем процесс разделения в соответствии с их массами. Эти два изотополога различаются по массе меньше чем на одну сотую процента, а потому попытки различить их сопровождаются существенными осложнениями. К тому же изотопологи встречаются в крайне малых концентрациях, что еще более затрудняет их анализ. Эду Янгу и его сотрудникам понадобился прибор с гораздо более высокой способностью различать массы и узнавать молекулы. Поэтому одним из первых шагов, предпринятых Обсерваторией глубинного углерода, стал сбор

средств для разработки опытного образца такого инструмента, стоимостью 2 млн долларов, пригодного для измерения содержания изотопологов в метане. (В этом приняли участие также Национальный научно-исследовательский фонд США, Департамент энергетики США, корпорация Shell Oil и Институт Карнеги в Вашингтоне.) Предприятие весьма рискованное. Чтобы создать такой прибор, понадобятся годы, а затем уйдет еще несколько лет, пока мы не убедимся, что он действует. Оправданием такому риску служит возможность получить определенный ответ на вопрос об источниках образования глубинного метана, а также представление об участии метана в кардинальном изменении климата на планете.

Циклы изменений

Возвращаясь к вопросу о Земле в эпоху неопротерозоя, отметим, что в конце первого ледникового периода, 700 млн лет назад, наступил переломный момент в состоянии климата. Важную роль сыграло при этом увеличение содержания углекислого газа в атмосфере; возможно, тому способствовало и внезапное высвобождение метана из газовых гидратов. В геологическое мгновение ока, может быть, в пределах тысячи лет климат резко изменился. Земля из снежного шара превратилась в парник, температура побила все рекорды.

Долгое время, примерно 30 млн лет, на Земле преобладал теплый климат, но парниковый эффект гарантировал собственную кончину. Содержание углекислого газа в атмосфере, достигнув своего максимума, начало постепенно уменьшаться. Часть парникового газа была изъята из атмосферы в процессе химических реакций с горными породами. Обнажившаяся земля, открытая осадкам, содержащим химически агрессивную углекислоту (следствие высокого содержания CO_2 в атмосфере), подверглась стремительному выветриванию. Приток минеральных питательных веществ вкупе с восстановлением потока солнечной энергии привел к скачкообразному росту водорослей, поглощающих парниковый газ.

И все эти события нашли отражение в летописи изотопов углерода. В течение 150 млн лет климат Земли колебался между этими двумя крайностями. Не раз и не два, а по меньшей мере три раза ледники наступали и отступали, и климат соответственно менялся от арктического холода к тропической жаре — и обратно. Первый ледниковый период, так называемое Стуртианское оледенение, достиг максимальной точки около 720 млн лет назад. За ним следовало Мариноанское оледенение, 650 млн лет назад. А потом менее суровое Гаскиерское оледенение, 580 млн лет назад. Мощные осадочные толщи в десятках стран отражают подробности этого драматического цикла. По мере отступления льда ледники оставляли после себя нагромождения вывернутых валунов и окатанных камней, комковатых тиллитов и отполированных скальных пород. Вскоре после этого слои тиллитов покрылись толщей отложений кристаллических карбонатных минералов — еще один характерный признак потепления океанов. Карбонатные осадки в перенасыщенных углекислым газом морских водах образовывались так быстро, что дно вскоре покрылось гигантскими кристаллами метровой длины. Эти повышенные скорости осадконакопления свидетельствуют о временах, когда измученная поверхность Земли утратила химическое равновесие — и навсегда ушел в прошлое застой «скучного» миллиарда.

Какое-то время после публикации в 1998 г. статьи Пола Хоффмана о ледяной Земле геологи с восторгом воспринимали картину ледяной планеты, но теперь энтузиазм слегка угасает. Создатели климатических моделей не соглашаются с тем, что вся Земля могла быть покрыта ледяным панцирем, потому что, по их расчетам, даже в период наибольшего охлаждения на экваторе сохраняется умеренный климат. Геологи обнаружили признаки открытой воды — следы движения льдов, поверхностных волн и морских течений в период максимального холода. Для большинства геологов более реальным представляется сценарий не снежного шара, а более благоприятной модели — «слякотного шара». Хоффман полагает, что слякоть характерна до периода ледникового максимума и сразу после него.

Как определить различие между ними? Любопытным доказательством в поддержку идеи снежного шара является быстрое возникновение железистых кварцитов, появившихся как раз в то время, когда Земля была предположительно полностью покрыта ледяным панцирем. Образование таких месторождений не поддается простому объяснению, поскольку морская вода лишилась почти всего железа более миллиарда лет назад, т. е. еще до начала «скучного» миллиарда. Как же океан снова обогатился железом? Согласно одной из моделей, оледенение сковало океан ледяной коркой, перекрыв доступ кислорода к основной толще воды. Тем временем подводные гидротермальные источники продолжали закачивать из мантии все новые порции железа в глубинные слои океана. Постепенно концентрация железа росла, что приводило к стремительному росту железистых кварцитов сразу после окончания ледниковых периодов.

Снежный шар — слякотный шар: противопоставление не является чем-то новым в науке, хотя оно вполне скромное и дружелюбное, в отличие от многих других. Пол Хоффман ушел в отставку, и новое поколение ученых приняло эстафету, поскольку ответы все еще скрываются в недрах Земли.

Тайна льда

Существует загадка и посложнее. Снежная или слякотная Земля, периоды оледенения были отнюдь не первыми в истории Земли и, скорее всего, не станут последними, но три промежутка в эпоху неопротерозоя выделяются особо. Насколько нам известно, ни до, ни после них такой холод не обрушивался на Землю. В чем причина? Почему один краткий период настолько выделяется в истории планеты?

Древнейший ледниковый период, сравнительно короткий, судя по залежам тиллита в древних кратонах Южной Африки, случился примерно 2,9 млрд лет назад, в разгар архейского эона. Остается загадкой, почему льду понадобилось столько времени, чтобы снова перейти в наступление с полюсов на экватор. На заре земной истории Солнце светило гораздо

слабее — в первые несколько сотен миллионов лет его излучение составляло всего 70% от нынешнего уровня, а во время среднеархейского оледенения — около 80%. Недостаток солнечной энергии должен был восполняться иными способами подогрева. Многие специалисты указывают в качестве главных источников на высокий процент концентрации парниковых газов — углекислого газа, метана и оранжевого углеводородного тумана. Кроме того, свою роль в изменении климата должны были сыграть тепловые потоки глубинных тектонических процессов и мощные вулканические извержения.

Как ни странно, первое глобальное оледенение могло быть отчасти вызвано слишком большим скоплением парникового газа. Если увеличивалось содержание метана в атмосфере, то в верхних слоях стратосферы соответственно увеличивалось количество больших молекул углеводорода, которые могли окутывать Землю оранжевым туманом. Если оранжевая дымка густела, то часть солнечной энергии блокировалась, что вело к охлаждению Земли.

Второй, более длительный период охлаждения климата, сопровождавшийся интенсивным образованием ледников, продолжался от 2,4 до 2,2 млрд лет назад и начался после раскалывания экваториального суперконтинента Кенорленд. Атмосферное моделирование показывает, что рост эрозии и осадочных отложений вдоль вновь образующихся береговых линий сопровождался поглощением большей части имевшегося углекислого газа. Одновременно с этим увеличение содержания кислорода в атмосфере вело к вытеснению из нее метана, одного из важнейших парниковых газов. Слабое солнечное излучение (примерно 85% от современного уровня) оказалось недостаточным для поддержания парникового эффекта — и начался длительный период охлаждения Земли.

В последующие 1,4 млрд лет (почти треть истории Земли, включая «скучный» миллиард) не было обнаружено никаких следов оледенения. Вероятно, климат Земли в этот период находился в замечательном балансе — не слишком жарко, не слишком холодно. Частично объяснить столь долгое отсут-

ствие существенных изменений климата можно серией отрицательных обратных связей, но точно выяснить причину трудно. Однако мы с уверенностью можем сказать, что примерно 740 млн лет назад климат Земли достиг критической точки и начался новый цикл Земля-снежок — Земля-парник.

Второе великое кислородное событие

Живые клетки оказались весьма чувствительными к экстремальным изменениям в масштабах планеты; последние 3,5 млрд лет биосфера испытала сильное воздействие меняющихся условий геосферы. Земля колебалась между жарой и холодом, и это способствовало усиленному размыванию и выветриванию берегов, что, в свою очередь, снабжало минеральным питанием прибрежные экосистемы. Одним из жизненно важных минералов, необходимых для фотосинтеза, был марганец. Так же в изобилии были молибден (необходимый для переработки азота) и железо (используемое для разнообразных обменных процессов). Но из всех химических элементов в неопротерозойских морях самым важным был фосфор. Он необходим для всех видов жизни. Фосфор помогает формировать основу генетических молекул ДНК и РНК, укрепляет клеточные мембраны и играет важнейшую роль в накоплении и передаче химической энергии от клетки к клетке.

Достоинства фосфора восхищают моего коллегу Доминика Папино, одно время бывшего научным сотрудником Геофизической лаборатории. Папино происходит из Французской Канады, что явствует из его мягкого акцента; о его увлеченности древнейшими месторождениями Земли красноречиво говорит его кабинет в Бостонском колледже, где почти все пространство занято разнообразными образцами пород. Он побывал в экспедициях в самых отдаленных уголках планеты, о чем свидетельствуют шлифованные куски строматолитов и образцы железистых кварцитов.

Папино обратил внимание на то, что в некоторых экосистемах рост микроорганизмов напрямую связан с доступным

количеством фосфора. Он реконструировал картину шельфовых зон неопротерозойских морей, куда в небывалых количествах поступал этот важный для жизнедеятельности минерал. Некоторые из самых крупных отложений фосфорита — осадков, образующихся в результате отложения богатых фосфором клеток, погибавших и опустившихся на дно, — сосредоточены в интервалах времени, совпадающих с ледниково-парниковыми циклами. Папино объехал чуть ли не всю планету в поисках этих древнейших слоев фосфоритов, был в северной Канаде, Финляндии, Африке и Индии, исследуя их геологические и химические особенности.

Обогащенные фосфором, цветущие водоросли накачивали атмосферу кислородом, доведя его содержание до 15%, что вполне пригодно для дыхания. Парадокс заключается в том, что гниющие водоросли, опускаясь на дно, активно вступали в реакцию с растворенным кислородом, превращая океанские глубины в мертвые бескислородные зоны. Таким образом, активное возрождение к жизни покрытой льдом Земли вело к расслоению океана на богатые кислородом поверхностные слои и бескислородные глубины. Доминик Папино усматривает параллели с современными прибрежными экосистемами, где мощные потоки фосфатов от стока удобрений точно так же стимулируют цветение водорослей в прибрежных зонах и образование бескислородных слоев на глубине.

Это возвращает нас к одному из главных принципов минеральной эволюции: совместной эволюции геосферы и биосферы. Минералы изменяют жизнь, жизнь изменяет минералы. Сорок лет назад, когда я изучал на старших курсах науку о Земле, биология и геология представлялись чуждыми друг другу. Грандиозный цикл образования горных пород рассматривался в абсолютном отрыве от циклов развития жизни. Когда я спрашивал своего научного руководителя, не следует ли мне включить курс биологии в число факультативных программ, он посоветовал вместо этого заняться квантовой механикой. «Биология вам никогда не пригодится», — заверил он меня.

Совет сомнительный, если учесть, что на каждой ступени эволюции Земли, от зарождения жизни и далее, органический мир воздействовал на геологию, а геология воздействовала на органику. В 2006 г. геохимик Мартин Кеннеди из Калифорнийского университета в Риверсайде опубликовал с четырьмя соавторами статью, где они рассмотрели абсолютно новый пример такой взаимозависимости, хотя и в теоретическом ключе. Их статья вышла в номере журнала *Science* (10 марта 2006 г.) под названием «Появление фабрики глинистых минералов». Согласно их тезисам, увеличение содержания кислорода в атмосфере от нескольких процентов до современного уровня произошло под воздействием положительной обратной связи между микроорганизмами и глинистыми минералами.

Глина состоит главным образом из мельчайших частиц минералов, которые, пропитываясь водой, образуют густую, вязкую массу. Если вам доводилось застрять ногой или колесами машины в сырой глине, вряд ли вы это забудете. Глинистые минералы образуются преимущественно за счет выветривания, особенно сопровождающегося химическими изменениями в условиях сырой, кислотной среды позднего неопротерозоя. Кеннеди и его соавторы предположили, что стремительное послеледниковое выветривание континентальной коры способствовало образованию гораздо большего количества глинистых минералов, чем в доледниковый период. К тому же имеются свидетельства того, что колонии микроорганизмов активно развивались на побережье именно в это время, именно микроорганизмы весьма эффективно превращают твердый камень в мягкую глину.

Одним из самых поразительных свойств глинистых минералов является их способность связывать органические биомолекулы. Интенсивное образование глинистых минералов изолировало богатую углеродом биомассу, и по мере того как их смывала морская вода, они (глинистые минералы) запечатывали этот углерод в мощные толщи тонкозернистого осадка. По мнению Кеннеди, захоронение углерода вело к росту кислорода в атмосфере, что, в свою очередь, ускоряло процесс образо-

вания глинистых минералов на суше, и еще большему захвату углерода. Таким образом, «производство глинистых минералов» могло непосредственно способствовать увеличению содержания кислорода в атмосфере и эволюции жизни на планете.

Появление животных

Расцвет водорослей, приводящий к парниковому эффекту, поддерживаемый фосфором и другими питательными веществами, несомненно, сопровождался резким притоком кислорода в атмосферу. Образование глинистых минералов еще больше усиливало этот эффект. В результате примерно 650 млн лет назад содержание кислорода в атмосфере почти достигло современного уровня. Высокая концентрация кислорода, в свою очередь, повлекла за собой возникновение сложных, многоклеточных форм жизни, поскольку лишь при таком уровне кислорода организмы могут вести такой активный, энергоемкий образ жизни, как это делают медузы и черви. Итак, древнейшие из известных многоклеточных организмов появились, если судить по известным образцам окаменелостей, около 630 млн лет назад, вскоре после второго глобального оледенения.

Чтобы составить более полное представление о возникновении животного мира в эпоху неопротерозоя, надо вернуться примерно на миллиард лет назад, во времена, предшествующие «скучному» миллиарду. Немногочисленные ископаемые находки указывают на то, что около 2 млрд лет назад на Земле появилась совершенно новая разновидность одноклеточных организмов. До этого все клетки существовали сами по себе, даже когда зависели друг от друга. Но, согласно революционной идее биолога Линн Маргулис из Массачусетского университета в Амхерсте, около 2 млрд лет назад одна клетка целиком поглотила другую. Однако вместо того, чтобы переварить поглощенный микроорганизм, более крупная клетка вобрала в себя малую, создав некий симбиоз, в результате которого развитие жизни на Земле необратимо изменилось.

Маргулис — человек весьма энергичный и многосторонний. Ее научная деятельность посвящена исследованию путей взаимодействия и совместной эволюции групп организмов; она рассматривает симбиотические связи и совместное использование биологических свойств как всеобщий принцип развития жизни. Ее идеи встретили активное сопротивление, отчасти потому, что отклонялись от общепринятой теории эволюции Дарвина, согласно которой эволюция осуществляется главным образом через мутацию и отбор. Несмотря на все разногласия, теория эндосимбиогенеза, сформулированная Маргулис, нашла признание и теперь разделяется почти всеми. Современные растения, животные и грибы состоят из клеток, включающих множество внутренних структур — митохондрий, которые действуют как микроскопические электростанции, преобразующие солнечную энергию в организмах, клеточных ядер, поддерживающих генетические молекулы ДНК. Эти и другие «органеллы» в объединенных сложных клетках имеют собственные мембраны и даже в некоторых случаях собственные молекулы ДНК. По мнению Маргулис, каждая органелла развилась из предыдущей, простейшей клетки, которая была поглощена более крупными клетками и, став их составной частью, выполняла свои биохимические функции. Как уже говорилось, это изменение началось около 2 млрд лет назад и подготовило почву для развития новых, более сложных многоклеточных форм жизни.

Маргулис видит причину эволюции жизни в симбиозе и объединении свойств несходных между собой организмов — этот подход она распространяет не только на эндосимбиогенез (что уводит ее далеко от воззрений большинства ученых). Один из ее выпадов, отчетливо сформулированный на выступлении перед геологами в Денвере, штат Колорадо, направлен на поддержку спорной идеи британского биолога Дональда Уильямсона. В 2009 г. Уильямсон предположил, что бабочки представляют собой слияние генетического материала двух совершенно различных живых существ — червеобразной гусеницы и крылатой бабочки. Противостояние еще больше усилилось, когда Маргулис воспользовалась своей привилегией

члена Национальной академии наук сокращать процесс экспертизы и способствовала публикации статьи Уильямсона в престижном журнале академии — *Proceedings*. Это вызвало возмущение у ряда членов академии, которые назвали гипотезу Уильямсона нонсенсом, более подходящим для дешевых таблоидов, чем для периодического издания Академии наук. Маргулис сочла, что работа Уильямсона достойна серьезного исследования и дискуссии. «Мы вовсе не требуем, чтобы все непременно согласились с идеями Уильямсона, — заявила она, — но надо оценить их с научной точки зрения, а не с позиции предрассудков».

Независимо от конечного исхода данной полемики теория эндосимбиогенеза Маргулис стала общепринятой. Ко времени неопротерозоя сложносоставные клетки с ядрами и различными внутренними структурами уже получили широкое распространение и были готовы преодолеть следующий симбиозный порог. Более 600 млн лет назад одноклеточные организмы научились взаимодействовать, соединяться, специализироваться и разрастаться в целые колонии. Они подготовились к тому, чтобы превратиться в животных.

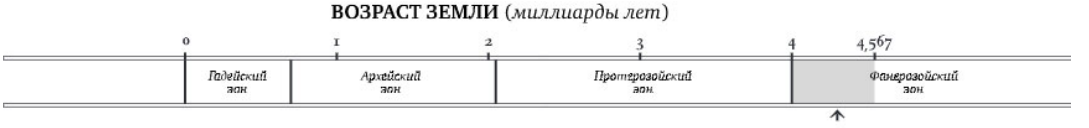
Древнейшее ископаемое свидетельство существования экосистем, в которых доминировали животные, приходится на так называемый Эдиакарский период, начавшийся около 635 млн лет назад, вскоре после второго из трех крупных оледенений. Первые, отчетливо различимые ископаемые остатки этого периода были обнаружены в горных породах возрастом 580 млн лет в Эдиакаре на юге Австралии (отсюда и название периода). Эти мягкотелые организмы, предположительно родственные медузам и червям, оставили симметричные отпечатки, похожие на блинчики с орнаментом или на причудливо резные листья до 60 см в диаметре. Похожие отпечатки были найдены по всему миру в породах, относящихся ко времени 610 и 535 млн лет назад. Самой замечательной из находок стали обнаруженные в богатых фосфором слоях Доушаньто на юге Китая возрастом 633 млн лет группы микроскопических клеток, интерпретированных как яйца и эмбрионы. Эти образо-

вания, выросшие на морских шельфах вскоре после Мариноанского оледенения, во всех отношениях выглядят идентичными современным эмбрионам животных.

Итак, получается, что жесткий ледниково-парниковый цикл в конце концов сыграл важнейшую роль в эволюции современного мира. Надо признать, что как многоклеточные организмы мы обязаны своим существованием тому периоду времени, когда 800 млн лет назад климат Земли достиг критической точки после миллиарда лет, в течение которых устойчивое солнечное излучение и теплоизоляционный слой углекислого газа поддерживали на планете тепло. Стремительное поглощение углекислого газа за счет выветривания вновь образованных экваториальных континентов, а также распространение ледяного покрова от полюсов к экватору привело к длительному понижению температуры на миллионы лет, пока не восстановился необходимый уровень CO_2, возможно, усиленный быстрым высвобождением метана с океанского дна, вызвав неудержимый парниковый эффект.

Эти очень нестабильные ледниково-парниковые циклы, вероятно, сильнее всех прочих факторов воздействовали на планету, выводя ее из состояния равновесия. Резкие смены климата в эпоху неопротерозоя привели к беспрецедентному росту уровня кислорода в атмосфере, что, в свою очередь, открыло дорогу для появления первых животных и растений и для освоения континентов. Это биологическое новшество привело к тому, что вскоре на Земле распространились новые существа: плавающие, зарывающиеся в землю, ползающие и летающие создания, осваивающие все более экстремальные среды обитания и демонстрирующие все более сложное поведение. Благодаря насыщенной кислородом атмосфере 650 млн лет назад, впервые в истории Земли, путешественник во времени, оказавшийся в окружении непривычного ландшафта, уже смог бы глубоко дышать, и ему не грозила бы мучительная смерть от удушья. Впервые можно было бы найти скудную, но все же пищу в зеленой тине, а также избежать смертельной дозы ультрафиолетового излучения.

Сегодня мы снова входим в период резкого изменения климата, поскольку начинают преобладать положительные обратные связи. Отражающий солнечные лучи ледниковый покров тает с нарастающей скоростью, открывая воду и сушу потоку солнечной энергии. Мы вырубаем и сжигаем деревья, накачивая таким образом атмосферу углекислым газом, поскольку уничтожаем главные потребители CO_2 — леса. Вдобавок от таяния вечной мерзлоты и океанского льда усиливается выброс метана, что может еще выше поднять температуру по всей планете, провоцируя выброс новых порций метана и тем самым нарушая баланс парниковых газов. Если прошлое Земли может послужить для нас уроком — внезапное изменение климата в эпоху неопротерозоя должно стоять первым в списке череды событий. Дело в том, что ледниково-парниковые сдвиги в климате хотя и открывали новые возможности для развития жизни, но при этом сами по себе вызывали гибель почти всего живого на Земле.



Глава 10

Зеленая Земля

Развитие земной биосферы

Возраст Земли: от 4 до 4,5 млрд лет
(последние 542 млн лет)

Глобальная тектоника спасла Землю от самой себя. Медленно и неуклонно конвекционные потоки в недрах Земли раскалывали экваториальный суперконтинент Родиния, распадающийся на более мобильные части. Континентальные массы сдвигались по направлению к полюсам, освобождая экватор от покрытой льдами суши, смягчая экстремальные состояния ледниково-парникового цикла. Изобилие новых видов водорослей также способствовало замедлению бурных колебаний концентрации углекислого газа, одновременно повышая содержание кислорода в атмосфере почти до современного уровня. С тех пор Земля уже не испытывала таких резких перепадов температуры, как во времена, предшествующие фанерозойской эпохе.

За последние 542 млн лет Земля подверглась пяти видам изменений. Продолжали смещаться континенты, вначале замыкая единственный океан формированием очередного суперконтинента, а затем, распадаясь, они образовали Атлантический океан, который до сих пор продолжает расширяться.

Климат менялся от холодного к теплому и обратно, однако не достигал уже тех ледниково-парниковых крайностей, как в эпоху неопротерозоя. Произошло третье Великое кислородное событие, которое сопровождалось сначала уменьшением атмосферного кислорода вдвое, а затем возвращением к предыдущему уровню. Постоянно менялся уровень моря, резко меняя очертания береговых линий континентов; судя по данным исследования горных пород, уровень колебался в пределах нескольких сотен метров. Но самые значительные перемены произошли в биосфере. И в процессе всех этих изменений жизнь и минералы развивались в тесной взаимосвязи.

Земля менялась всегда, но особенно радикальные изменения произошли в эпоху фанерозоя, о разнообразии и сложности которых свидетельствуют горные породы гораздо более отчетливо, чем в прежние времена. Ключевые данные об этой яркой эпохе содержатся в прекрасно сохранившихся ископаемых остатках, подтверждающих процесс развития у живых организмов и растений устойчивых, твердых элементов: зубов, панцирей, костей и древесины. Животные и растения оказались особенно чувствительными к изменениям приповерхностной среды на Земле, и их окаменелые остатки свидетельствуют о поэтапной адаптации. Микроорганизмы способны выдержать почти любые невзгоды; эта устойчивость наряду с простыми формами и редкой встречаемостью в виде окаменелостей означает, что в докембрийскую эпоху, когда микроорганизмы водились в изобилии, не происходило их массовой гибели.

Иначе обстояло дело в фанерозое. В последние 542 млн лет Земля предстает перед нами совсем в ином свете. Это уже не планета, которая неспешно меняется в течение десятков, а то и сотен, миллионов лет, это стремительно развивающийся мир — каждые сто тысяч лет он становился совсем иным, отличаясь от предыдущего периода. Мы узнаем об этом отчасти благодаря более богатым находкам, но в принципе это заложено в самой природе жизни. Животные и растения, особенно те, которые освоили сушу, немедленно откликались на цикли-

ческие перемены Земли — им приходилось реагировать и развиваться быстро, чтобы выжить. Прежние биологические виды вымирали, а их место занимали новые.

Весь мир — театр

Дрейфующие континенты на протяжении 550 млн лет продолжали обеспечивать подвижную сцену для эволюции Земли к ее биоразнообразию. История в основе своей незамысловата — обычная пьеса в трех действиях.

Действие первое. В начале кембрийского периода, 542 млн лет назад, протерозойский суперконтинент Родиния раскололся на несколько частей, больших и поменьше. Самый крупный из них, протянувшийся от Северного полюса до экватора, назван Гондвана — в честь одного из интересных для геологов районов Индии. Все существующие сегодня южные континенты плюс значительная полоса Азии представляли собой единый гигантский материк, протяженностью более 12 тыс км с севера на юг. Остальные отколовшиеся части Родинии были в основном сосредоточены в Южном полушарии, включая основу Лаврентии (нынешняя Северная Америка вместе с Гренландией) и несколько крупных островов (в том числе значительную часть современной Европы). Мировой океан занимал почти все Северное полушарие. В течение следующих 250 млн лет глобальная тектоника сдвигала все континенты к северу. Лаврентия удвоилась в размере, вначале слившись с тем, что впоследствии стало Европой, а затем и присоединив значительную часть Сибири.

Действие второе. Около 300 млн лет назад дрейфующая на север Гондвана столкнулась с Лаврентией, образовав самый молодой из суперконтинентов — Пангею. Одним из грандиозных геологических последствий слияния Гондваны и Лаврентии стало исчезновение древнего внутреннего моря между Северной Америкой и Африкой — событие, породившее Аппалачские горы. В наше время Аппалачи имеют сравнительно мягкие, округлые очертания. Такое топографическое

превращение свидетельствует о мощной силе выветривания, так как 300 млн лет назад их молодые, зазубренные пики возвышались на 10–11 тыс. м над уровнем моря, что сопоставимо с современными Гималаями как одними из самых высоких горных хребтов в истории планеты. Кривобокая Пангея, вобрав в себя практически всю земную сушу, сосредоточилась на одной стороне планеты, причем три четверти суперконтинента располагались в Южном полушарии. В течение 100 млн лет Пангею со всех сторон омывал суперокеан Панталасса (от греч. παν-, θάλασσα — «все море»).

Действие третье. Раскрытие Атлантического океана началось 175 млн лет назад, когда огромный материк Пангея начал распадаться на семь основных частей. Вначале разошлись Лаврентия и Гондвана, образовав новорожденный Северо-Атлантический океан, но постепенно раскалывание континентальных масс открывало пространство по направлению на северо-запад и юго-восток. Антарктида и Австралия откололись от Гондваны и сместились на юг, образовав самостоятельные обособленные материки. Рифт между Южной Америкой и западным побережьем Африки увеличился, сформировав Южно-Атлантический океан, а Индия, отколовшись от восточного побережья Африки, начала свой путь на север, продолжавшийся 50 млн лет, в конце которого врезалась в Азию, породив в этом столкновении Гималайский хребет.

В течение этой затянувшейся истории все континенты-участники носились туда-сюда, то вступая в тесный контакт, то разрывая связи, совсем как в человеческой драме. Чтобы представить себе ход событий, стоит посмотреть эту пьесу в действии: например, поискать в Интернете видео «Pangaea animations». Наблюдая за постепенным раскалыванием и дрейфом континентов, не забудьте, что смещение континентальных масс вызвало и другие изменения на планете. Растягивание береговых линий способствовало росту биомассы в прибрежных водах. Полярные участки суши покрывались толстой коркой льда, что, в свою очередь, вызывало понижение уровня моря. Жизнь на больших континентах боролась за существова-

ние в крайне жестких условиях; одновременно эволюция продолжалась и на обособленных островных материках, в отделенных друг от друга морях. Расположение горных хребтов и океанов воздействовало на климат. На протяжении всей истории, в том числе и современной, все крупные земные циклы влияли друг на друга.

Взрыв животной жизни!

В течение миллиардов лет количество микроорганизмов на Земле увеличивалось и уменьшалось — в зависимости от климатических условий, источников питания, солнечной энергии и многого другого. Новые данные из шельфовых отложений позволяют предположить, что расцвет водорослей в конце неопротерозоя был отнюдь не случайным или временным явлением. Впервые в истории зеленые водоросли выработали новые механизмы закрепления на болотистой суше — материки украсились по краям зеленой каймой, смягчив зрительный контраст по-марсиански оранжевой суши и синего океана. Увеличивалась концентрация кислорода в атмосфере, а также озонового слоя в стратосфере, создавая надежный барьер, препятствующий радиации и защищающий поверхность Земли от смертоносного ультрафиолетового излучения Солнца. Такая защитная оболочка стала решающей прелюдией к расцвету жизнеспособной биосферы на земном пространстве, позволив растениям укореняться, а животным — свободно передвигаться по суше.

Как ни странно, животным понадобилось еще 100 млн лет, чтобы полностью перебраться на сушу. Долгое время всевозможные биологические преобразования происходили на прогреваемых солнечными лучами шельфах. На протяжении 40 млн лет многоклеточные медузы и черви доминировали в послеледниковом океане. Мириады мягкотелых животных, плохо сохранившихся в ископаемой летописи, кормились отложениями на морском дне, находя убежище в минеральных отходах, оставленных им в наследство микроорганизмами-

предшественниками. Десятки миллионов лет сохранялся экологический status quo.

Этот статус нарушился примерно 530 млн лет назад поразительной уловкой эволюции: некоторые типы животных научились наращивать собственные защитные оболочки из твердых минералов. Точно не известно, когда именно произошел этот виток эволюции, ведь жизнь уже миллиарды лет сопровождалась минеральными отложениями в виде рифообразных строматолитов. Каким-то образом, где-то после Гаскерского оледенения, 580 млн лет назад неизвестного вида животные сумели нарастить собственные защитные оболочки из самых обычных минералов — чаще всего из карбоната кальция или двуокиси кремния. Это новшество означало шаг вперед в борьбе за выживание, так как хищники предпочитали пожирать мягкотелую добычу, нежели тратить драгоценную энергию на раскалывание твердого минерализованного экзоскелета. Поэтому мягкотелым необходимо было обзавестись собственным панцирем — либо погибнуть. Результаты этой эволюции в большом количестве отразились в ископаемых образцах, которые точно обозначили время, называемое «кембрийский взрыв», когда в слоях осадочных пород появилось множество отпечатков — свидетелей жизни.

Однако слово «взрыв» вводит в заблуждение. Это преображение отнюдь не было внезапным; процесс «биоминерализации» животных занял много миллионов лет. Губки с твердым скелетом, сохранившиеся в богатой ископаемыми окаменелостями формации Доушаньто в провинции Гуйчжоу на юге Китая, возможно, освоили этот процесс примерно 580 млн лет назад. К концу эдиакарского периода, примерно 550 млн лет назад, различные червеобразные на океанском дне приспособились использовать карбонаты для отращивания трубкообразных защитных домиков.

Первые значительные следы фауны с экзоскелетом, правда, мелкой и хрупкой, отпечатались на осадочных породах по всей планете около 535 млн лет назад. (Мне вспоминается студенческая полевая практика на побережье в Наханте, к северу

от Бостона, штат Массачусетс, где мы собирали эти редкие окаменелости. Свежий морской воздух, волны, живописный скалистый берег, кудрявые белые облака и синева океана — все это навсегда врезалось в память, в отличие от малопривлекательных, еле различимых невооруженным глазом окаменелостей.)

Подлинный «взрыв» произошел на несколько миллионов лет позже, примерно 530 млн лет назад, когда на сцене внезапно появились животные со всевозможными типами панцирей. Началась эволюционная гонка вооружений. Броненосные хищники и броненосные жертвы приобретали все более внушительные размеры. Одни отращивали зубы и когти, другие укрывались под пластинчатым костяным панцирем. Глаза стали незаменимым органом, чтобы выжить в мире убийц густонаселенных палеозойских океанов. Последние полмиллиарда лет земной истории богато отмечены массивными слоями известняка, образованными в результате жизнедеятельности и гибели бесчисленных поколений ракушечных созданий, биоскелеты которых превращались в карбонатные осадки. Громадные, полные ископаемых окаменелостей, карбонатные утесы и гребни встречаются по всему миру, в десятках стран, образуя высочайшие пики Скалистых гор в Канаде и белые меловые утесы Дувра, покрывая даже вершину горы Эверест.

Из всех кембрийских эволюционных новообразований самыми прославленными и фотогеничными являются пучеглазые морские членистоногие — трилобиты. Здесь нужно оговориться. Мне ужасно нравятся трилобиты, с тех пор когда в возрасте семи-восьми лет я впервые выкопал один из них и продолжаю пополнять коллекцию по сей день. В моем собрании насчитывается более двух тысяч образцов, которые я постепенно передаю Смитсоновскому институту. (Несколько хорошо сохранившихся экземпляров можно увидеть в Зале морской фауны и флоры в Национальном музее естественной истории Смитсоновского института.) Так что я должен признать свою пристрастность.

Несмотря на медленное начало биоминерализации, примерно 530 млн лет назад живые существа с твердым скелетом

внезапно распространились повсюду. Всевозможные разновидности ногастых трилобитов и бороздчатых двустворчатых моллюсков, похожих на орех брахиопод и хрупких веерообразных мшанок, ноздреватых губок и рогатых кораллов сохранились во всех осадочных породах, отлагавшихся слой за слоем по всему земному шару. В отложениях от Монтаны до Марокко можно наткнуться на слой — надежный отпечаток истории, — который свидетельствует о точном времени поразительного изобретения биоброни.

Одно из самых замечательных мест, где можно проследить внезапный переход от мягкотелых к панцирным животным, находится в историческом оазисе Тиут у подножья живописного хребта Антиатлас в западной части Марокко. Тысячи метров открытых всем ветрам, почти вертикальных карбонатных отложений в долине реки Соусс дают наглядное представление о конце Эдиакарского и начале Кембрийского периода. Слой за слоем красновато-бурого известняка совершенно не содержит привычных видов ископаемых. Можно пройти целый километр вдоль покрытого галькой берега реки, большую часть года полностью пересыхающей, и не обнаружить ничего, кроме прорытого червяком хода.

Внезапно в одном из слоев известнякового холма прямо над деревней — горизонт, который издали ничем не отличается от остальных, нижних или верхних, — обнаруживаются ископаемые. Eofallotaspis, пожалуй, древнейший из трилобитов, знаменует начало кембрийского взрыва. В более молодых слоях, залегающих немного выше этого знаменательного слоя, обнаруживаются новые виды: характерные 5-сантиметровые овальные отпечатки Choubertella и Daguinaspis. Последний встречается довольно часто, но самый богатый находками слой располагается на территории, окружающей могилу мусульманского святого, место поклонения верующих. Небольшое белое строение с куполом окружено невысокой скалистой грядой, изобилующей отпечатками трилобитов. Пришлым геологам не позволят нарушать покой усыпальницы стуком молотка о зубило. На местных ребятишек, видимо, запрет не распро-

страняется, и они бодро продают «жуков из Тиута» туристам, постучав в окно машины со словами «Эй, мистер, сто дирхемов!» (около 12 долларов) и протягивая свежевыкопанные окаменелости. Я не торгуюсь. Я покупаю все.

Смена фаций

Многие годы я собирал преимущественно ископаемых членистоногих. Невозможно передать словами, какие чувства охватывают, когда, отколов кусок породы, обнаруживаешь внутри целого окаменевшего трилобита. Наверное, рыбак испытывает нечто подобное, поймав крупную рыбу, или игрок в покер, которому выпала полная флешь; для меня потрясением всегда является находка редкого вида животного, жившего 500 млн лет назад.

Какое-то время меня вполне удовлетворяли такие находки. Потом, весной 1970 г., будучи студентом старших курсов, я слушал первый настоящий курс палеонтологии уважаемого Роберта Шрока. Боб Шрок преподавал в MTI почти сорок лет и почти двадцать лет, после Второй мировой войны, возглавлял в нем отделение геологии и геофизики. Опубликовав множество трудов, самым выдающимся из которых является Каталог ископаемых Северной Америки, увесистый компендиум с фотографиями характерных образцов по всем геологическим периодам, он был титаном в этой области, талант которого воодушевлял студентов.

Роберт Шрок, талантливый педагог, покорял своей мягкой улыбкой, естественным общением, чувством юмора и бесконечной любовью к профессии. Он вел занятия в непринужденной, дружеской манере, рассказывая о древних временах с живостью очевидца. Именно так он поведал студентам о сделанном 100 лет назад случайном открытии сланцев Бургес в Британской Колумбии — местонахождение возрастом 505 млн лет, где были обнаружены замечательные ископаемые мягкотелых организмов, широко известные благодаря труду Стивена Джея Гулда «Удивительная жизнь». Он описал,

как прелестные ископаемые остатки мелких лягушек сохранились в мелкозернистых илистых осадках в стволах деревьев возрастом 300 млн лет — в Джоггинсе, на западном побережье Новой Шотландии (мелкие лягушки запрыгивали в дупла стволов и не могли выбраться оттуда). Он живописал картины того, что происходило 90 млн лет назад, когда обширное внутреннее море покрывало территорию нынешних Великих равнин американского Среднего Запада — моря, где между собой соперничали гигантские рептилии и кальмароподобные аммониты.

По прихоти судьбы, мы с моей женой Марджи (в то время студенткой старших курсов в Уэлсли-колледже) оказались двумя последними студентами Боба Шрока. Весной 1970 г. студенческие протесты против войны во Вьетнаме достигли апогея; занятия срывались, размеренная жизнь института была нарушена. Учитывая охватившее всех безумие, руководство MTI позволило студентам свободно посещать занятия по системе «зачет — незачет», отменив экзамены с оценкой в баллах. Мы с Марджи оказались единственными, кто выбрал экзамен с оценкой по палеонтологии. Наш изнурительный итоговый экзамен представлял собой недельный марафон, в течение которого мы должны были распознавать все образцы из целой кучи окаменелостей и зарисовывать их. Рисование, конечно, составляет важную часть в подготовке профессиональных исследователей, но я от природы лишен к этому способностей. Каждый карандашный набросок был для меня настоящим кошмаром; на него уходила целая вечность, и я даже припомнить не могу, сколько ластиков я на это творчество извел.

Этот курс палеонтологии оказался последним. Новым деканом факультета в 1965 г. стал сейсмолог Франк Пресс и произвел «смену караула», увеличив количество часов для точных наук, математики и физики в специализации «Наука о Земле». Нарисованные окаменелости не вписывались в этот современный подход, при котором глобальная тектоника затронула не только континенты, но и учебный план.

Под влиянием последнего курса палеонтологии мы с Марджи впоследствии тратили чуть ли не все выходные, бродя по местам, богатым ископаемыми. В течение нескольких лет мы собирали окаменелые образцы папоротников на юге Массачусетса, кораллов на северо-востоке Пенсильвании, брахиопод в восточной части штата Нью-Йорк и трилобитов на северо-западе Вермонта. Занятия у Шрока заставили нас взглянуть на эти ископаемые находки совсем под другим углом. Каждый вид породы и набор окаменелостей повествовал о разнообразии древних экосистем.

Мы узнали, что в любой отдельно взятый период несколько разных видов пород — различных фаций — формируется в определенном месте и на определенной глубине водоема. Песчаник формируется ближе всего к берегу, в неровных, мелководных приливных зонах. В них сохраняются окаменелости крупных моллюсков и улиток с прочными раковинами, которые способны выдержать бурный прибой. В отличие от песчаника, известняк включает древние коралловые рифы, а также богатое разнообразие живых организмов — стебельчатых морских лилий, морских звезд, улиток, плеченогих и другие виды, обитающих в прогретых солнцем лагунах. Многие из изысканных трилобитов в рифовых экосистемах отличаются огромными глазами, способными просматривать окружающую среду на все 360°. Еще дальше от берега в глубоких, темных водах медленно накапливаются черные сланцы; их фауна состоит из фильтраторов* и черных трилобитов — организмов, резко отличающихся от тех, что обитают в менее глубоких светлых зонах.

Каждое обнажение отражает определенный период времени и место, а последовательность слоев, расположенных друг над другом, повествует о характере перемен. Особенно выразительные чередования слоистых пород часто связаны с экономически ценными (а потому хорошо изученными) угольны-

* Фильтраторы — водные животные, питающиеся мелкими планктонными организмами или взвешенными частицами (детрит), отцеживаемыми из воды. — *Прим. ред.*

ми месторождениями. Уголь, в изобилии формировавшийся в заболоченных прибрежных зонах 300 млн лет назад, обычно залегает между слоями песчаника, которые, в свою очередь, граничат со сланцами. Такая последовательность — сланец, песчаник, уголь, песчаник, сланец, повторяющаяся несколько раз, свидетельствует о значительной разнице в уровне моря, который то поднимался, то опускался, то снова поднимался, возможно, в связи с продвижением и отступлением полярных льдов и глетчеров. Напрашивается неизбежный вывод о том, что за сотни миллионов лет уровень воды в океане постоянно менялся на сотни метров.

Современному человеку, с нашими гигантскими прибрежными городами и обширными морскими инфраструктурами, уровень воды в океане (по крайней мере в пределах ритма приливов и отливов) представляется постоянным в масштабе всей планеты. Мы с трудом представляем себе изменение даже метра на три, не говоря уже о сотнях метров. Но исследование осадочных пород однозначно указывает на такие перемены. В течение последних нескольких десятков тысяч лет уровень воды в океанах неоднократно то поднимался более чем на 50 м, то опускался на 100 м ниже современного. Вне всякого сомнения, такие сдвиги будут происходить снова, радикально меняя очертания берегов. Вот такую историю рассказывают нам горные породы и ископаемые экосистемы.

Жизнь на суше

Самое кардинальное преобразование суши в истории планеты было связано с возникновением наземных растений — новшеством, фиксируемым по наличию отчетливых, микроскопических спор в породах возрастом 475 млн лет. Хотя сами отпечатки нежной, легко поддающейся разрушению растительности тех времен не сохранились, по крайней мере пока не обнаружены, те первые настоящие растения, возможно, походили на современный печеночный мох (печеночник) — это были лишенные корней, крепко цеплявшиеся за землю потомки

зеленых водорослей, способные выжить лишь в низменных, сырых местностях. В течение более 40 млн лет, судя по сохранившимся в наземных породах спорам, именно такие растения выживали на суше. Эволюция тех выносливых растительных первопроходцев, видимо, проходила медленно, но неуклонно.

Около 430 млн лет назад, судя по разнообразию ископаемых спор по всей планете, произошел заметный сдвиг в наземной растительности. В течение следующих 30 млн лет споры печеночника встречаются гораздо реже, зато распространяются разнообразные виды мхов и простейших сосудистых растений. В породах этого периода в Шотландии, Боливии, Китае и Австралии встречаются древнейшие окаменелости собственно растений — отпечатки лишайников и других предков современных сосудистых растений (с внутренним «водопроводом», т. е. сетью наполненных водой канальцев). Не имея развитой корневой системы, эти короткие, приземистые растения тоже тяготели к низменным, сырым местам.

Окаменелостей со временем становилось все больше по мере распространения и укрепления растительности. Около 400 млн лет назад примитивные сосудистые растения начали постепенно разрастаться, покрывая некогда бесплодные участки суши по всему земному шару. Они выглядели как тонкие, безлиственные, миниатюрные кустики с зеленоватыми стеблями и веточками, которые поднимались на несколько сантиметров над почвой. Их корни уже достаточно глубоко проникали даже в каменистый грунт, удерживая растение как надежный якорь, а сеть капилляров подавала воду к верхним частям растения. Несмотря на важную роль, которую они сыграли в распространении жизни на планете, эти растения довольно долго держались на вторых ролях, уступая первенство известности трилобитам и динозаврам. Животным, хищникам и жертвам присущ более динамичный образ жизни, а также большее разнообразие форм и поведения — они больше похожи на нас. К тому же ископаемые растения представлены в основном фрагментарно — обычно в виде отдельного листа или стебля,

кусочка коры или древесины. Растениям не хватает, по выражению Кевина Бойса, палеоботаника из Университета Чикаго, «завершенности двухстворчатых моллюсков», тем не менее они могут рассказать удивительные истории.

Впервые я встретился с Кевином в 2000 г., когда он, будучи перспективным, полным энтузиазма аспирантом в Гарварде, работал у Энди Ноула и уже тогда подумывал о том, как извлечь побольше информации из древнейших ископаемых растений. Ненасытный читатель и одаренный писатель, Кевин любил сочинять рассказы — он из тех ученых, кто может рассказывать увлекательнейшие истории о растениях. Но для новых рассказов о древнейших земных растениях ему требовались дополнительные данные о растительных окаменелостях. Энди направил Кевина в Геофизическую лабораторию для освоения техники микроанализа элементов, изотопов и молекул — техники, никогда до тех пор не применявшейся в систематическом исследовании ископаемых растений.

Предметом нашего первого совместного исследования стали хорошо сохранившиеся ископаемые образцы, возрастом 400 млн лет, кремнистых сланцев Райни близ деревни Райни в графстве Абердин, Шотландия. Райниевой растительности повезло: она избежала гниения, поскольку ее окружали горячие источники, пропитывая минерализованной водой ее ткани, герметически запечатывая и частично заполняя капиллярную сеть мелкозернистым кремнеземом. Столетие назад геологи обнаружили в каменной ограде вокруг деревушки Райни булыжники кремнистого сланца. Только после основательных изысканий удалось найти небольшой участок коренного кремнистого сланца и начать раскопки. Кремнистый сланец Райни остается ценным и редким материалом, но Кевин Бойс получил в Гарварде доступ к старой коллекции образцов величиной с кулак, а также укрепленных на стеклянной подставке тонких, полированных, прозрачных срезов, в которых можно было до мельчайших деталей рассмотреть под микроскопом анатомию окаменелых растений. В этих окаменелостях запечатлелись фрагменты причудливого ландшафта, знакомого

и чуждого одновременно, покрытого стебельчатыми растениями, с зелеными стеблями, но без листьев.

Несколько десятилетий назад попытки извлечь информацию из райниевых окаменелых растений можно было назвать поистине героическими. Требовалось приготовить сотни тончайших срезов, чтобы получить из каждого двумерное изображение сложного трехмерного объекта. Представьте себе любимый цветок, заключенный в твердую непрозрачную эпоксидную массу, и попытайтесь мысленно восстановить форму цветка, расчленив эту массу на плоские срезы, а затем заново собрав срезы в целый цветок. Именно это и приходилось проделывать когда-то палеоботаникам с образцами из Райни. В результате были восстановлены странные, длинные и тонкие безлиственные растения — предки зеленого покрова Земли.

Кевин Бойс решил еще раз поехать в Райни, чтобы собрать больше данных о древнейшей флоре Земли. Он намеревался разрезать образцы и отполировать срезы райниевых окаменелостей размером и формой примерно с 25-центовую монету. Мы использовали электронный зонд — прибор, показывающий расположение химических элементов в отполированных срезах, похожих на наши образцы сланцев, хорошо знакомый минералогам, но редко применяемый палеонтологами. Мы надеялись выяснить, сохранились ли в образцах какие-нибудь частицы растительных тканей. Загвоздка состояла в том, чтобы настроить электронный зонд на распознавание углерода, столь распространенного в жизни, но редко присутствующего в породах. К нашей радости, райниевые образцы изобиловали углеродом, к тому же в виде легких изотопов, что неопровержимо свидетельствовало о его биологическом происхождении. Следы углерода отчетливо обрисовывали трубчатые структуры, свойственные древним сосудистым растениям. Наша первая статья, описывающая клеточный уровень ископаемых растений из Райни, включая их причудливые стебли и споры, была опубликована в журнале «Труды Национальной академии естественных наук» в 2001 г.

Следующим шагом Кевина была попытка извлечь биомолекулярную информацию из образцов ископаемых растений. Не удастся ли нам получить молекулярные данные из растительных тканей? Кевин Бойс сконцентрировал внимание на таинственном древовидном организме под названием прототаксит, высотой около 8 м, который 400 млн лет назад был самым крупным из известных на Земле растений. Окаменелые остатки этого организма представляют собой загадку, поскольку их клеточный состав отличается от существовавших в то время более мелких растений. В отличие от них «стволы» прототаксита состояли из причудливо переплетенных трубчатых структур. Вместе с моими коллегами по Геофизической лаборатории Мерилин Фогель и Джорджем Коди Бойс сумел извлечь и исследовать молекулярные фрагменты нескольких образцов прототаксита — они резко отличались от других ископаемых растений. Бойс пришел к парадоксальному выводу: прототаксит был гигантским грибом, возможно, самой крупной поганкой в истории Земли.

Исследования Кевина Бойса подтвердили выводы специалистов по палеоботанике. Четыреста миллионов лет назад земной ландшафт был покрыт зеленой растительностью, совершенно чуждой современному миру. Чахлые, стебельчатые растения обитали на суше по соседству с гигантскими древовидными грибами в компании с мелкими насекомыми и паукообразными животными.

Появление листьев

Человек вполне мог выжить на Земле 400 млн лет назад. На планете было достаточно воды и кислорода. Растения и насекомые вполне годились в пищу. Укрытием могли служить шляпки гигантских прототакситов. Но окружающий ландшафт показался бы совершенно чужеродным. У растений были зеленые стволы и ветви, но не было листьев.

Действительно, на создание первых крошечных листочков — ловушек энергии понадобились еще десятки миллионов

лет эволюционной борьбы растений за солнечную энергию. Самое высокое растение с самыми крупными листьями обладало преимуществом — и в этом направлении развивались веерообразные папоротники, разветвленные кроны и могучие древесные стволы. Около 360 млн лет назад на планете возникли леса — совершенно новый вид наземной экосистемы. Впервые в истории земная суша покрылась изумрудной зеленью.

И опять вспомним основную идею — горные породы развивались в единстве с новой, зеленеющей жизнью. Стремительное распространение растений на суше, в том числе гигантских деревьев, имело серьезные минералогические последствия. Климатическое выветривание наземных пород, включая базальты, граниты и известняки, сопровождалось развитием корневой системы деревьев и их быстрым биохимическим распадом. В результате возникали, углубляясь и распространяясь все шире, почвы, богатые глинистыми минералами, органической материей и целыми армиями микроорганизмов, которые, в свою очередь, обеспечивали плодородную среду обитания для роста все более крупных деревьев и грибов.

Корневые системы, скрытые под землей, стремительно эволюционировали. Одним из самых важных факторов стали новые симбиотические отношения между корнями растений и разветвленными грибницами, называемыми микоризой. Это удивительное звено эволюции повлияло на многие из существующих по сей день видов растительности; на самом деле некоторые растения плохо развиваются на почвах, где отсутствуют грибные споры. Микоризные грибы эффективно извлекают фосфаты и другие питательные вещества из почвы и передают их растениям, которые, в свою очередь, регулярно снабжают грибы глюкозой и другими углеводами. Эту конструкцию нелегко представить, но на самом деле переплетение корней и нитей грибниц под землей часто намного превосходит по размерам наземную часть дерева, видимую глазом.

По мере распространения съедобных растений интенсивно развивался и животный мир. Первыми наземными обитателями суши стали беспозвоночные: насекомые, пауки, черви

и другие мелкие существа. Позвоночные, родоначальником которых 500 млн лет назад послужила беззубая рыба, претерпели эволюцию протяженностью более 100 млн лет, находясь в океане, прежде чем начали колонизировать сушу. Свирепые, страшные на вид броненосные рыбы с могучими челюстями возникли 420 млн лет назад; более знакомые нам хрящевые акулы и костистые рыбы появились и породили множество разновидностей в течение следующих 20 млн лет. Но на суше позвоночных не было вообще.

Недавнее открытие в Китае костей ископаемых рыб возрастом 395 млн лет показало эволюционный переход от рыб с их плавниками к четвероногим наземным животным. Примерно в течение 20 млн лет рыбы вольготно существовали на шельфе, а порой и на прибрежной суше. У некоторых видов рыб развились примитивные легкие, что позволяло им проводить на суше все больше времени, но потребовались еще миллионы лет, чтобы животные с прочным скелетом полностью освоились на суше и стали постоянно дышать воздухом. Кости древнейшего ископаемого четвероногого животного — ходячей рыбы, лапы которой были больше похожи на ласты, найдены в породе возрастом 375 млн лет.

За последние два десятилетия усилился интерес ученых к процессу перехода от рыбы к амфибии, что привело к расцвету палеонтологических открытий по всему миру, от Китая до Пенсильвании. Судя по новым ископаемым находкам, переходные формы животных существовали примерно в течение 30 млн лет, постепенно приспосабливаясь к условиям суши, но все еще сохраняя отчетливые анатомические признаки рыб. Первые подлинные амфибии появились около 340 млн лет назад, в разгар так называемого Каменноугольного периода, когда сырые низины по всему миру покрывались болотистыми лесами. Эти примитивные сухопутные животные, обладавшие характерными широкими и плоскими черепами и расходящимися в стороны пятипальцевыми лапами, а также ушами, способными прислушиваться к наземным звукам, и другими «сухопутными» чертами, явственно отличались от своих

рыбьих предков. Ко временам Каменноугольного периода земная твердь уже имела более близкий к современному вид: была покрыта дремучими зелеными лесами, где росли в основном папоротниковые деревья, болотными трясинами и сочными лугами, населенными бесчисленной армией насекомых, амфибиями и другими существами. Благодаря взаимодействию с живой природой прибрежные горные породы и минералы также приблизились к современному состоянию по своему разнообразию и расположению.

Но не думайте, что на Земле опять наступили застойные времена. Менялись погодные условия, засухи и наводнения терзали сушу, не говоря уже о неожиданных падениях астероидов и извержениях супервулканов, которые наносили жизни такой урон, какого хотелось бы избежать в будущем. Но Земля со своей флорой и фауной оказалась невероятно устойчивой ко всем напастям. Жизнь всегда приспосабливается к изменениям окружающего мира, когда бы эти изменения ни происходили.

Третье Великое кислородное событие

300 млн лет назад Земля была покрыта густыми лесами. Лиственная биомасса воспроизводилась и отмирала в таких масштабах, что из плотного слоя отмерших растений начал формироваться новый вид породы — богатый углеродом черный уголь (отсюда и название — каменноугольный период). Одним из следствий такого потребления углерода органикой стало новое обогащение атмосферы кислородом, подобное тому кислородному событию, которое произошло в предыдущую неопротерозойскую эпоху. Возрастание содержания кислорода в атмосфере шло постепенно, от примерно 18% 380 млн лет назад до 25% около 350 млн лет назад, а затем до 30% или больше 300 млн лет назад. По некоторым оценкам, одно время содержание кислорода в атмосфере превышало 35%, т. е. было значительно выше современного уровня. Эти цифры отнюдь не являются догадками: в прекрасных образцах янтаря каменноугольного периода, в окаменевшем древесном соке

встречаются пузыри древней атмосферы, которые до сих пор содержат более 30% кислорода.

Повышение содержания кислорода в атмосфере благоприятно сказалось на развитии животного мира. Больше кислорода — больше энергии и выше скорость метаболизма. Самым ярким проявлением всплеска в животном мире оказались гигантские насекомые, например чудовищная стрекоза с размахом крыльев около метра. Увеличение объема кислорода способствовало повышению плотности воздуха, что облегчало летание и парение. Несомненно, именно в это время животные начали подниматься на возвышенные места, поскольку сгущение воздуха способствовало дыханию в горах.

В течение десятков миллионов лет на суперконтиненте Пангея жизнь процветала. Этому способствовал мягкий климат и изобилие ресурсов. Но внезапно таинственным образом 251 млн лет назад произошло самое крупное стихийное бедствие в истории Земли — жизнь почти исчезла.

Великое вымирание и другие массовые бедствия

За последние 540 млн лет накопилось множество ископаемых: сотни тысяч образцов кораллов и морских лилий, плеченогих и щупальцевых мшанок, двустворчатых моллюсков и улиток, не говоря уже о гигантском количестве микроорганизмов. Это свидетельствует о потрясающей биологической изобретательности. По данным специалистов, только трилобитов насчитывается более 20 тыс. разновидностей, и год за годом в каталогах появляются новые описания. С учетом того, что трилобиты населяли Землю всего около 180 млн лет (от 430 до 250 млн лет назад), в среднем каждые несколько тысяч лет появлялся новый вид трилобита. Если же судить по богатейшему разнообразию окаменелостей, можно прийти к выводу, что в течение 500 млн лет каждое столетие появлялось несколько новых видов.

Однако по данным ископаемых образцов трудно выявить явления массового вымирания, внезапной гибели миллио-

нов разновидностей живых существ. Относительно просто отследить появление новых форм живых существ, и палеонтологи не могут устоять перед искушением описать «первое» или «самое раннее» появление целого класса или каких-либо особых признаков. Первое растение, первая амфибия, первый таракан или первая змея (хотя и с рудиментарными задними конечностями) — главные герои в каталогах ископаемых. Автор одной из публикаций возвестил об открытии древнейшего в мире окаменелого пениса (принадлежность паука, жившего 400 млн лет назад) — очередная выдающаяся находка среди райниевых ископаемых.

Гораздо труднее распознать по окаменелым образцам потери. Установить вымирание можно только путем тщательного изучения разнообразных ископаемых остатков — слой за слоем, период за периодом, в масштабах всей планеты. В результате усилий исследователей в течение нескольких десятилетий удалось установить пять эпизодов массовой гибели за прошедшие 540 млн лет — пять жутких событий, во время которых на Земле вымерло больше половины всех разновидностей живых существ. По мере накопления данных выясняется, что помимо этих пяти имели место не менее пятнадцати эпизодов, правда, не столь масштабных.

Не так просто выявить такие потери по окаменелым образцам, учитывая наступление и отступление океанов, образование и исчезновение мелких морей, замедление образования отложений во время ледниковых периодов, а также неизбежные утраты в результате выветривания. Летопись горных пород отличается разрозненностью и неполнотой, вроде энциклопедии, из которой наугад вырвано множество страниц и полностью потеряно несколько томов. Часто трудно установить геологический возраст того или иного слоя, тем более сопоставить геологические тела в разных частях света. Иными словами, отсутствие той или иной группы животных может быть связано просто с перерывом осадконакопления и образованием таким образом пробелов в геологической летописи. Тем не менее по мере накопления данных и сравнения палеонтологических

находок по всему миру становится очевидным, что массовые вымирания животных являются необычным событием на фоне нормального чередования жизни и смерти.

Наиболее масштабное массовое вымирание имело место в конце палеозойской эры, 251 млн лет назад. По некоторым оценкам, тогда погибло 70% земных и целых 96% морских существ — глобальная катастрофа, названная Великим вымиранием. Ни до, ни после этого события не исчезало с лица Земли так много живых существ (включая все виды трилобитов).

Мнения специалистов относительно причин Великого вымирания расходятся. Разумеется, это не было разовым событием вроде столкновения с крупным астероидом; не было оно и мгновенным. На самом деле, по-видимому, сыграли роль несколько неблагоприятных факторов. Во-первых, 251 млн лет назад уровень кислорода резко упал с высоких значений в Каменноугольном периоде (35%) до 20%. Большое количество кислорода было благоприятно для поддержания жизни высокоразвитых животных, в то же время падение его уровня было большим ударом по животным, привыкшим к «расточительности», которым требовалось много кислорода для метаболизма. В конце палеозоя произошло сильное похолодание и формирование умеренно ледникового периода — южная окраина Пангеи покрылась толстым слоем льда. Вследствие этого понизился уровень воды в океане, обнажив большинство континентальных шельфов. Континентальные шельфы представляют собой самую благоприятную биосферу, и потеря большей части мелководных прибрежных зон наверняка ограничила рост коралловых рифов и других разнообразных экосистем, нарушив цепочку питания в океане.

Активизация вулканической деятельности в конце палеозоя, почти точно совпавшая с массовым вымиранием 251 млн лет назад, составляет другой стрессовый фактор для биосферы Земли — еще одно свидетельство влияния геосферы на биосферу. Продолжительное извержение вулканов в Сибири, выбросившее не менее полутора миллионов кубических километров базальта, одно из самых крупных вулканических событий

в истории Земли, нанесло сокрушительный удар по живой природе. В течение сотен тысяч лет выбросы вулканического пепла и пыли уменьшали доступ солнечной энергии и усугубили оледенение, а ядовитые сернистые газы спровоцировали кислотные дожди, что привело к дальнейшему упадку биосферы.

Помимо указанных факторов, некоторые ученые обращают внимание на разрушение озонового слоя как на еще одну возможную причину, вызвавшую величайшее массовое вымирание в истории Земли. Любопытным свидетельством, если не явной уликой, являются мутантные ископаемые споры, найденные в породах конца палеозоя по всему миру, от Антарктиды до Гренландии. Возможно, вулканические выбросы в Сибири послужили толчком для химических реакций в верхних зонах атмосферы, в результате чего уменьшился озоновый слой, открыв окно мутагенному ультрафиолетовому излучению. Каковы бы ни были причины, Великое вымирание пробило огромную брешь в биологическом разнообразии Земли. Для восстановления потребовалось 30 млн лет, но оно все же произошло. Как обычно, после подобных эпизодов большие потери открывали новые возможности. Наступила новая эра — мезозой, и новая фауна и флора заполнили свободные ниши.

Динозавры!

Преуспевающий издатель как-то посоветовал мне: если я хочу, чтобы мои научные труды успешно раскупались, следует включать в них две популярные темы — черные дыры и динозавры. (Этот издатель умудрился даже включить черные дыры в название одной из моих книг, хотя книга не имела к ним никакого отношения.)

Итак, приступим. Динозавры появились около 230 млн лет назад как бенефициарии массовой гибели животного мира в конце палеозоя. Эти очаровательные рептилии вначале были мелкими и медлительными, но на протяжении более 160 млн лет породили разнообразие видов и распространились во всех экологических нишах. Какое-то время после Великого вымира-

ния динозавры соперничали с крупными амфибиями, но очередное вымирание 205 млн лет назад, совпавшее с повышенной вулканической активностью, практически уничтожило большинство других позвоночных, не-динозавров. Последовал бурный рост динозавров.

Динозавры являются наиболее любопытными и интригующими представителями мезозойской эры. Самыми распространенными ископаемыми того периода считаются элегантные спиральные раковины морских головоногих, известных как аммониты. Если бы я не провел детство вблизи палеозойских осадочных пород, богатых окаменелыми трилобитами, а вместо этого вырос где-нибудь в мезозойских землях Южной Дакоты, я, пожалуй, коллекционировал бы аммониты. У них потрясающе красивые раковины, обладающие характерной спиральной симметрией и перламутровой поверхностью. Остатки этих головоногих, отдаленных предков наутилуса, раковина которого тоже состоит из камер, отличаются изысканным рисунком на раковинах, «швами», которые некогда отделяли одну внутреннюю камеру раковины от другой. В отличие от трилобитов, раковины аммонитов не дают полного представления о целом организме. Крупная вытянутая голова с огромными глазами и десятью щупальцами до нашего времени не сохранилась. Уцелело лишь бронированное жилище для этого гораздо более интересного (чем само жилище) животного. Аммониты населяли мезозойские моря, эволюционируя и становясь более разнообразными в течение 160 млн лет.

В мезозое существовали и многие другие любопытные биологические виды. Именно в это время впервые появились цветочные растения. Тогда же возникли и первые млекопитающие. Как и во все периоды истории Земли, изменения в биосфере соседствовали с изменениями географии земного мира. Начала раскалываться Пангея, и образовался Атлантический океан. Содержание кислорода в атмосфере продолжало снижаться, достигнув опасной отметки 15%, но потом снова подскочило до 21%, что примерно равно современному значению.

Уровень моря то повышался, то понижался, но значительного оледенения в мезозойскую эру не наблюдалось, во всяком случае ничего подобного ледниковому периоду конца палеозоя не произошло.

Перейдем ко времени 65 млн лет назад — одному из самых мрачных периодов в земной истории. Астероид диаметром около 10 км врезался в Землю в районе нынешнего полуострова Юкатан. Гигантское цунами пронеслось по всему земному шару, возникли масштабные пожары, выжигая целые континенты. Громадные тучи испарившегося грунта затмили небо и сильно ограничили фотосинтез. Этот космический удар пришелся по планете, и без того переживавшей не лучшие времена. На массовое вымирание конца палеозоя эхом откликнулись вулканы в Индии, вызвав значительные перемены в атмосфере и ослабив экосистемы Земли на сотни тысяч лет. К этому же времени произошло значительное обмеление морей, обнаживших большую часть континентального шельфа, ослабив связи в цепочке питания и уничтожив тысячи видов аммонитов, из которых выжили только восемь. Причины такого обмеления не вполне ясны, поскольку в это время не отмечалось значительного похолодания. Некоторые исследователи полагают, что виновником могло послужить снижение активности срединного хребта в океане, вызвавшее охлаждение, усадку и последующее опускание всего океанского дна.

Каковы бы ни были причины, действовали ли они по отдельности или вместе, но вымерли все динозавры, за исключением одной незначительной боковой ветви — птиц. Вымерли и последние виды аммонитов. Путь к эволюции млекопитающих был открыт. Эти мелкие, похожие на грызунов позвоночные неплохо устроились по соседству с более крупными (а потому обреченными) родственниками-динозаврами, и то, что им удалось выжить во время мезозойского вымирания, проложило им дорогу почти во все экологические ниши. В Индии в течение 10 млн лет вулканической активности и из-за последствий столкновения с астероидом млекопитающие развивали многообразие видов; в пределах

15 млн лет сформировались древние предки китов, летучих мышей, лошадей и слонов.

Итак, массовые вымирания на Земле повторялись, бросая вызов жизни и провоцируя ее развитие. За последние 540 млн лет приливы и отливы этого явления регулярно продолжаются. Но как обстояло дело с более древними временами? Случались ли массовые вымирания ранее 540 млн лет назад? Здесь палеонтологи заходят в тупик. До кембрийского взрыва не найдено ископаемых доказательств. Статистика вымирания требует значимой численности таких хорошо различимых организмов, как динозавры или трилобиты; ранее 540 млн лет их просто не существовало. Испытывали ли микроорганизмы аналогичные периоды угнетения и уменьшения количества видов? На Земле наверняка и раньше случались и масштабные столкновения с астероидами, и вспышки вулканической деятельности, которые уничтожали все живое на обширных пространствах планеты. Жизнь подвергалась крайней опасности во время превращения Земли в снежный ком и более ранних ледниковых периодов. Отсчитывая время назад к началу зарождения жизни на Земле, мы допускаем сотни таких массовых вымираний живых организмов. Но разрозненные, микроскопические следы докембрийских окаменелостей не позволяют нам узнать об этом наверняка.

Эпоха человека

Более 99,9% существования Земли прошли без человека. Мы — лишь один миг земной истории. Сравнительно недавнее появление Homo sapiens можно проследить до тех грызуноподобных предков, которые выжили 65 млн лет назад после падения на Землю астероида размером с Манхэттен. В течение нескольких миллионов лет после вымирания динозавров млекопитающие заняли свободные экологические ниши в полях и джунглях, горах и пустынях, в воде и воздухе. При этом последние 65 млн лет отнюдь не были для них легкими. Многие из странных и удивительных видов млекопитающих исчезли в периоды

других массовых вымираний 56, 37 и 34 млн лет назад, и причины их гибели до сих пор неясны.

Человек произошел от уцелевших в последней катастрофе млекопитающих примерно 30 млн лет назад. Мартышки, человекообразные обезьяны и мы сами восходим к общему предку-примату. Первые гоминиды, ветвь эволюции, включающая прямоходящих приматов, появились примерно 8 млн лет назад в Центральной Африке.

Между тем периодические возвращения ледникового периода, начавшиеся около 20 млн лет назад, наращивают интенсивность и частоту. За последние 3 млн лет по крайней мере восемь раз льды надвигались от полюсов, покрывая значительные пространства высоких широт и достигая на юге северных территорий Среднего Запада. Пусть и не такие глобальные, как события времен «снежного шара», эти повторяющиеся оледенения сопровождались резким понижением уровня моря — на сотни метров. Ледяные мосты связывали Азию и Северную Америку, способствуя миграции в Новый Свет множества разных видов млекопитающих, в том числе мамонтов, мастодонтов и в конечном итоге — людей.

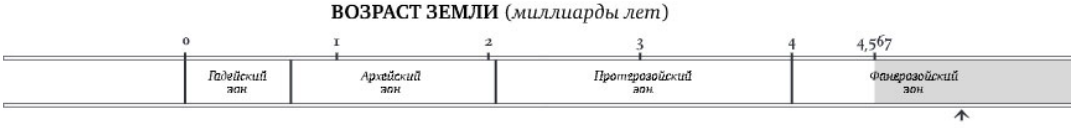
Эти ледниковые периоды привели к очередному поразительному витку эволюции. Согласно одной увлекательной теории, низкие температуры способствуют выживанию тех детенышей, которые длительное время остаются возле матери, а также тех, у кого большие головы (чем больше голова, тем дольше сохраняется тепло). В большой голове больше мозга, а длительное пребывание около матери продлевает время обучения. Видимо, отнюдь не случайно первый человек, Homo habilis, т. е. «человек умелый», появился вскоре после одного из таких оледенений — 2,5 млн лет назад.

Именно человеку удалось выжить в течение многих тысячелетий и адаптироваться к постоянно меняющимся условиям. Наступление льдов чередовалось с необычно теплыми «межледниковыми» периодами: такие циклы, по большей части милосердно постепенные, продолжались в течение многих поколений, и кочевые человеческие группы имели возмож-

ность менять места обитания и таким образом выживать. Это один из сравнительно недавних примеров адаптации в ответ на изменчивые условия окружающей среды.

Поистине, за последние полмиллиарда лет земной истории наблюдалось поразительное взаимодействие между живой материей и горными породами — совместная эволюция, которая эффективно продолжается в эпоху человека технологического. Многие эоны тому назад горные породы, вода и воздух сотворили жизнь. Жизнь, в свою очередь, сделала атмосферу пригодной для дыхания и превратила планету в зеленый и безопасный для прогулок мир. Жизнь преобразовала породы в почву, которая питала новые поколения живых существ и стала домом для бесконечных поколений фауны и флоры.

На протяжении всей земной истории воздух, моря, суша и живая материя формировались посредством преобразующей энергии Земли: энергией солнечного света и внутренней тепловой энергией планеты, магической энергией воды, химической энергией углерода и кислорода, безостановочным теплообменом земных недр, вызывающим разломы земной коры в результате землетрясений, извержений вулканов и глобальной тектоники континентальных плит. Среди всех этих могучих сил наш вид сумел проявить устойчивость, ум и способность к адаптации. Мы научились всяким техническим уловкам, чтобы переделать мир по своему вкусу: мы добываем и обогащаем металлы, удобряем и возделываем почву, поворачиваем и используем реки, извлекаем и сжигаем ископаемое топливо. Наши действия не остаются без последствий. Каждый день, если настроиться на динамические процессы нашего планетарного дома, можно почувствовать каждую грань его творческой энергии. И только тогда мы поймем, насколько разрушительными могут оказаться перемены в нашем мире и насколько незначительны по сравнению с этим наши мимолетные притязания.



Глава 11

Будущее

Сценарии будущих изменений Земли

Возраст Земли: следующие 5 млрд лет

Является ли прошлое прологом к будущему? Что касается Земли, то можно ответить: и да, и нет.

Как и в прошлом, Земля продолжает оставаться беспрерывно меняющейся системой. Планету ожидает череда потеплений и похолоданий. Ледниковые периоды вернутся, так же как периоды экстремальных потеплений. Глобальные тектонические процессы продолжат двигать континенты, смыкать и размыкать океаны. Падение гигантского астероида или извержение сверхмощного вулкана могут снова нанести жестокий удар по жизни.

Но будут происходить и иные события, столь же неизбежные, как образование первой гранитной коры. Мириады живых существ вымрут навсегда. Обречены на исчезновение тигры, белые медведи, горбатые киты, панды, гориллы. Высока вероятность того, что и человечество тоже обречено.

Многие подробности земной истории по большей части неизвестны, а то и вовсе непознаваемы. Но изучение этой истории, а также законов природы дает представление о том, что может произойти в будущем. Давайте начнем с пано-

рамного обзора, а потом постепенно сосредоточимся на нашем времени.

Эндшпиль: следующие 5 млрд лет

Земля почти наполовину прошла путь к своей неизбежной кончине. В течение 4,5 млрд лет Солнце светило достаточно стабильно, постепенно увеличивая яркость по мере сжигания своих колоссальных запасов водорода. Следующие пять (или около того) миллиардов лет Солнце продолжит вырабатывать ядерную энергию за счет преобразования водорода в гелий. Именно так поступают почти все звезды большую часть времени.

Рано или поздно запасы водорода закончатся. Звезды помельче, достигая этой стадии, просто затухают, постепенно уменьшаясь в размерах и излучая все меньше энергии. Будь Солнце таким красным карликом, Земля просто промерзла бы насквозь. Если бы на ней и сохранилась какая-то жизнь, то только в виде особо выносливых микроорганизмов глубоко под поверхностью, где еще могли бы оставаться запасы жидкой воды.

Однако Солнцу такая жалкая смерть не грозит, поскольку оно обладает достаточной массой, чтобы иметь запас ядерного топлива для другого сценария. Вспомним, что каждая звезда удерживает в равновесии две противоборствующие силы. С одной стороны, гравитация притягивает звездное вещество к центру, насколько возможно уменьшая ее объем. С другой — ядерные реакции, подобные бесконечной серии взрывов внутренней водородной бомбы, направлены наружу и соответственно пытаются увеличить размер звезды. Нынешнее Солнце находится в стадии сжигания водорода, достигнув стабильного диаметра около 1 400 000 км — этот размер продержался 4,5 млрд лет и продержится еще примерно 5 млрд.

Солнце достаточно велико, чтобы после окончания фазы выгорания водорода началась новая, мощная фаза выгорания гелия. Гелий, продукт слияния атомов водорода, может соединяться с другими атомами гелия, образуя углерод, но эта ста-

дия эволюции Солнца будет иметь катастрофические последствия для внутренних планет. За счет более активных реакций на основе гелия Солнце будет становиться все больше и больше, вроде перегретого аэростата, превращаясь в пульсирующий красный гигант. Он распухнет до орбиты Меркурия и просто проглотит крошечную планету. Он достигнет орбиты нашей соседки Венеры, проглотив заодно и ее. Солнце распухнет в сто раз больше нынешнего своего диаметра — вплоть до орбиты Земли.

Прогнозы земного эндшпиля весьма мрачные. Согласно некоторым черным сценариям, красный гигант Солнце просто уничтожит Землю, которая испарится в раскаленной солнечной атмосфере и перестанет существовать. По другим моделям Солнце выбросит более трети своей нынешней массы в виде невообразимого солнечного ветра (который будет беспрестанно терзать мертвую поверхность Земли). Поскольку Солнце утратит часть своей массы, земная орбита может расшириться — в таком случае она, возможно, избежит поглощения. Но даже если нас не пожрет огромное Солнце, все, что останется от нашей прекрасной голубой планеты, превратится в бесплодную головешку, продолжающую обращаться по орбите. В недрах могут еще на миллиард лет сохраниться отдельные экосистемы микроорганизмов, но ее поверхность уже никогда не покроется сочной зеленью.

Пустыня: 2 млрд лет спустя

Медленно, но верно, даже в нынешний спокойный период выжигания водорода, Солнце все больше разогревается. В самом начале, 4,5 млрд лет назад, свечение Солнца составляло 70% от современного. Во времена Великого кислородного события, 2,4 млрд лет назад, интенсивность свечения составляла уже 85%. Спустя миллиард лет Солнце станет светить еще ярче.

Какое-то время, возможно, даже много сотен миллионов лет, обратные связи Земли сумеют смягчать это воздействие.

Чем больше тепловой энергии, тем интенсивнее испарение, следовательно, увеличение облачности, что способствует отражению большей части солнечного света в космическое пространство. Увеличение тепловой энергии означает ускорение выветривания пород, усиленное поглощение углекислого газа и снижение уровня парниковых газов. Таким образом, отрицательные обратные связи довольно долго будут сохранять условия для поддержания жизнедеятельности на Земле.

Но переломный момент неизбежно наступит. Сравнительно небольшой Марс достиг такой критической точки миллиарды лет назад, потеряв всю жидкую воду на поверхности. Через какой-нибудь миллиард лет земные океаны начнут испаряться с катастрофической скоростью и атмосфера превратится в бесконечную парилку. Не останется ни ледников, ни заснеженных вершин, и даже полюса превратятся в тропики. В течение нескольких миллионов лет жизнь может сохраняться в таких тепличных условиях. Но по мере разогревания Солнца и испарения воды в атмосферу водород начнет все быстрее улетучиваться в космос, что вызовет медленное высыхание планеты. Когда океаны полностью испарятся (что, возможно, произойдет через 2 млрд лет), поверхность Земли превратится в бесплодную пустыню; жизнь окажется на краю гибели.

Новопангея, или Амазия: 250 млн лет спустя

Кончина Земли неизбежна, но случится она очень и очень нескоро. Взгляд в менее отдаленное будущее рисует более привлекательную картину динамично развивающейся и относительно безопасной для жизни планеты. Чтобы представить себе мир через несколько сотен миллионов лет, следует в прошлом поискать ключи к пониманию будущего.

Глобальные тектонические процессы продолжат играть свою важную роль в изменении облика планеты. В наше время континенты отделены друг от друга. Широкие океаны разделяют Америку, Евразию, Африку, Австралию и Антарктиду. Но эти громадные участки суши находятся в постоянном дви-

жении, и его скорость составляет примерно 2–5 см в год — 1500 км за 60 млн лет. Мы можем установить довольно точные векторы этого движения для каждого материка, изучая возраст базальтов океанского дна. Базальт возле срединных океанских хребтов довольно молод, не старше нескольких миллионов лет. В отличие от него возраст базальта у континентальных окраин в зонах субдукции может достигать более 200 млн лет. Несложно учесть все эти возрастные данные состава океанского дна, перемотать ленту глобальной тектоники назад во времени и получить представление о подвижной географии земных континентов за последние 200 млн лет. На основе этой информации можно также спроецировать движение континентальных плит на 100 млн лет вперед.

С учетом современных траекторий этого движения по всей планете оказывается, что все континенты движутся к очередному столкновению. Через четверть миллиарда лет большая часть земной суши снова станет одним гигантским суперконтинентом, и некоторые геологи уже пророчат его название — Новопангея. Однако точное устройство будущего единого континента остается предметом научной полемики.

Сборка Новопангеи — мудреная игра. Можно учесть современные подвижки континентов и предсказать их путь на ближайшие 10 или 20 млн лет. Атлантический океан расширится на несколько сотен километров, в то время как Тихий океан сузится примерно на то же расстояние. Австралия сдвинется на север по направлению к Южной Азии, и Антарктида слегка удалится от Южного полюса в сторону Южной Азии. Африка тоже не стоит на месте, медленно продвигаясь на север, вдвигаясь в Средиземное море. Через несколько десятков миллионов лет Африка столкнется с Южной Европой, сомкнув Средиземное море и воздвигнув на месте столкновения горный хребет размером с Гималаи, по сравнению с которым Альпы покажутся просто карликами. Таким образом, карта мира через 20 млн лет покажется знакомой, но слегка перекошенной. Моделируя карту мира на 100 млн лет вперед, большинство разработчиков выделяют общие географические признаки, например, соглаша-

ясь, что Атлантический океан обгонит по размеру Тихий и станет самым крупным водным бассейном на Земле.

Однако с этого места модели будущего расходятся. Согласно одной теории, экстраверсии, Атлантический океан продолжит раскрываться и в результате обе Америки в конце концов столкнутся с Азией, Австралией и Антарктидой. На поздних стадиях этой сборки суперконтинента Северная Америка замкнет на востоке Тихий океан и столкнется с Японией, а Южная Америка загнется по часовой стрелке с юго-востока, соединившись с экваториальной частью Антарктиды. Все эти части удивительно совмещаются друг с другом. Новопангея окажется единым материком, протянувшись с востока на запад вдоль экватора.

Основной тезис экстраверсионной модели заключается в том, что крупные конвекционные ячейки мантии, расположенные под тектоническими плитами, сохранятся в их современном виде. Альтернативный подход, называемый интроверсией, придерживается противоположной точки зрения, ссылаясь на предыдущие циклы смыкания и размыкания Атлантического океана. Реконструируя положение Атлантики за последний миллиард лет (или аналогичного океана, расположенного между двумя Америками на западе и Европой вместе с Африкой на востоке), специалисты утверждают, что Атлантический океан смыкался и размыкался трижды циклами по несколько сотен миллионов лет — этот вывод предполагает, что теплообменные процессы в мантии носят изменчивый и эпизодический характер. Судя по анализу горных пород, в результате движений Лаврентии и других континентов около 600 млн лет назад образовался предшественник Атлантического океана, называемый Япетус, или Япет (по имени древнегреческого титана Япета, отца Атласа). Япетус оказался замкнутым после сборки Пангеи. Когда этот суперконтинент начал раскалываться 175 млн лет назад, образовался Атлантический океан.

Согласно сторонникам интроверсии (пожалуй, не стоит называть их интровертами), продолжающий расширяться

Атлантический океан последует тем же путем. Он замедлит ход, остановится и отступит примерно через 100 млн лет. Затем, еще через 200 млн лет обе Америки снова сомкнутся с Европой и Африкой. Одновременно Австралия и Антарктида соединятся с Юго-Восточной Азией, образуя суперконтинент под названием Амазия. Этот гигантский материк в форме горизонтально расположенной латинской буквы L включает те же самые части, что и Новопангея, но по этой модели обе Америки образуют его западную окраину.

В настоящее время обе модели суперконтинентов (экстраверсия и интроверсия) не лишены достоинств и все еще пользуются популярностью. Каков бы ни оказался исход этой полемики, все сходятся в том, что, хотя через 250 млн лет география Земли значительно изменится, она все же будет отражать прошлое. Временная сборка континентов в районе экватора уменьшит влияние ледниковых периодов и умеренных изменений уровня моря. В местах столкновения континентов воздвигнутся горные хребты, произойдут перемены в климате и растительности, а также будут иметь место колебания уровней кислорода и углекислого газа в атмосфере. Эти изменения будут повторяться в течение всей истории Земли.

Столкновение: грядущие 50 млн лет

Недавний обзор на тему, как погибнет человечество, отразил весьма низкий рейтинг столкновения с астероидами — что-то около 1 на 100 000. Статистически это совпадает с вероятностью смерти от удара молнии или от цунами. Но в этом прогнозе имеется очевидный изъян. Как правило, молния убивает примерно 60 раз в год по одному человеку. В отличие от этого столкновение с астероидом, возможно, не убило ни одного человека за несколько тысяч лет. Но в один далеко не прекрасный день скромный удар может уничтожить вообще всех.

Велика вероятность того, что нам не о чем беспокоиться, да и сотням последующих поколений тоже. Но можно не сомневаться в том, что однажды произойдет крупная катастрофа вроде

той, что погубила динозавров. В грядущие 50 млн лет Земле предстоит пережить такой удар, возможно, даже не один. Это всего лишь вопрос времени и стечения обстоятельств. Самые вероятные злодеи — астероиды, сближающиеся с Землей, — объекты с сильно вытянутой орбитой, которая проходит недалеко от земной орбиты, близкой к круговой. Известны не менее трехсот таких потенциальных убийц, и в предстоящие несколько десятилетий некоторые из них пройдут в опасной близости от Земли. 22 февраля 1995 г. обнаруженный в последний момент астероид, получивший благопристойное имя 1995 CR, со свистом пронесся довольно близко — в нескольких расстояниях Земля–Луна. 29 сентября 2004 г. астероид Таутатис, продолговатый объект, примерно 5,4 км диаметром, прошел еще ближе. В 2029 г. астероид Апофис, обломок примерно 325–340 м в диаметре, должен приблизиться еще больше, глубоко войдя в лунную орбиту. Это неприятное соседство неизбежно изменит собственную орбиту Апофиса и, возможно, в будущем еще больше приблизит его к Земле.

На каждый известный ныне астероид, пересекающий орбиту Земли, имеется с десяток или более еще не обнаруженных. Когда такой летающий объект, в конце концов, обнаружат, может оказаться слишком поздно для того, чтобы что-то предпринять. Если мы окажемся мишенью, то, возможно, в нашем распоряжении будет всего несколько дней для предотвращения опасности. Бесстрастная статистика приводит нам расчеты вероятности столкновений. Почти ежегодно на Землю падают обломки около 10 м в диаметре. Благодаря тормозящему эффекту атмосферы большинство таких снарядов взрывается и распадается на мелкие части еще до соприкосновения с поверхностью. Но объекты диаметром 30 и более метров, встречи с которыми происходят примерно раз в тысячу лет, приводят к значительным разрушениям в местах падения: в июне 1908 г. такое тело рухнуло в тайге поблизости от реки Подкаменная Тунгуска в России. Очень опасные, диаметром около километра, каменные объекты падают на Землю примерно раз в полмиллиона

лет, а астероиды в пять и более километров могут упасть на Землю примерно раз в 10 млн лет.

Последствия таких столкновений зависят от размера астероида и местности падения. Пятнадцатикилометровый валун опустошит планету, где бы он ни упал. (Например, астероид, погубивший динозавров 65 млн лет назад, был, по расчетам, около 10 км в поперечнике.) Если 15-километровый камушек обрушится в океан — 70% вероятности, с учетом соотношения площадей воды и суши, — то почти все горы на земном шаре, кроме самых высоких, будут снесены разрушительными волнами. Исчезнет все, что находится ниже 1000 м над уровнем моря.

Если астероид такого размера рухнет на сушу, разрушение будет более локальным. Будет уничтожено все в радиусе двух-трех тысяч километров, а по всему материку, который окажется несчастливой мишенью, пронесутся опустошительные пожары. Какое-то время удаленные от удара местности смогут избежать последствий падения, но такой удар взметнет в воздух безмерное количество пыли от разрушенных камней и почвы, на годы засорив атмосферу пыльными облаками, отражающими солнечный свет. Фотосинтез практически сойдет на нет. Растительность погибнет, и пищевая цепь прервется. Часть человечества может выжить в этой катастрофе, но цивилизация в том виде, в каком мы ее знаем, будет уничтожена.

Мелкие объекты вызовут менее разрушительные последствия, но любой астероид более сотни метров в диаметре, рухнет ли он на сушу или в море, вызовет стихийное бедствие страшнее тех, что нам известны. Что же делать? Можем ли мы игнорировать угрозу как нечто отдаленное, не столь значительное в мире и без того полном проблем, требующих немедленного решения? Можно ли каким-то способом отклонить крупный обломок?

Покойный Карл Саган, пожалуй, самый харизматичный и влиятельный представитель ученого сообщества за последние полвека, немало размышлял об астероидах. Публично и в частных беседах, а большей частью в своей знаменитой телепередаче «Космос» он ратовал за согласованные действия

на международном уровне. Он начал с того, что рассказал увлекательную повесть о монахах Кентерберийского собора, которые летом 1178 г. стали свидетелями колоссального взрыва на Луне — это было очень близкое от нас падение астероида менее чем тысячу лет назад. Если бы такой объект рухнул на Землю, погибли бы миллионы людей. «Земля — крошечный уголок на огромной арене космоса, — сказал он. — Вряд ли кто-то придет к нам на помощь».

Простейший шаг, который надо сделать в первую очередь, это обратить самое пристальное внимание на опасно приближающиеся к Земле небесные тела — врага надо знать в лицо. Нам нужны точные телескопы, снабженные цифровыми процессорами, чтобы локализовать приближающиеся к Земле летающие объекты, вычислить их орбиты и сделать расчеты их будущих траекторий. Стоит это не так уж дорого, и кое-что уже делается. Конечно, можно было бы совершить больше, но по крайней мере какие-то усилия предпринимаются.

А что если мы обнаружим крупный объект, который может врезаться в нас через несколько лет? Саган, а вместе с ним и целый ряд других ученых и военных считают, что самый очевидный путь — вызвать отклонение траектории астероида. Если начать вовремя, то даже незначительный толчок ракеты или несколько направленных ядерных взрывов могли бы существенно сдвинуть орбиту астероида — и тем самым направить астероид мимо цели, избежав столкновения. Он доказывал, что разработка такого проекта требует интенсивной и долгосрочной программы космических исследований. В пророческой статье 1993 г. Саган писал: «Поскольку угроза астероидов и комет касается каждой обитаемой планеты в Галактике, если таковые имеются, разумным существам на них придется объединяться, чтобы покинуть свои планеты и переместиться на соседние. Выбор прост — улететь в космос или погибнуть».

Космический полет или гибель. Чтобы выжить в отдаленном будущем, мы должны колонизировать соседние планеты. Вначале надо создать базы на Луне, хотя наш светящийся спутник еще долго останется негостеприимным миром для жизни

и работы. Следующий — Марс, где наличествуют более солидные ресурсы — не только большие запасы замороженных грунтовых вод, но и солнечный свет, минералы и разреженная, но атмосфера. Это не будет легким и дешевым предприятием, и вряд ли Марс в ближайшем будущем превратится в процветающую колонию. Но если поселиться там и культивировать почву, наш многообещающий сосед вполне может стать важной ступенью в эволюции человечества.

Два явных препятствия, возможно, отдалят, а то и вовсе сделают невозможным поселение людей на Марсе. Первое — деньги. Десятки миллиардов долларов, которые понадобятся на разработку и осуществление полета на Марс, превышают даже самый оптимистичный бюджет НАСА, и это при благоприятных финансовых условиях. Международное сотрудничество явилось бы единственным выходом, но пока таких крупных международных программ не состоялось.

Другой проблемой является вопрос выживания астронавтов, ибо практически невозможно обеспечить безопасный полет на Марс и обратно. Суров космос, с его бесчисленными метеоритными песчинками-снарядами, способными пронзить тонкую оболочку даже бронированной капсулы, и непредсказуемо Солнце — с его взрывами и смертоносной, проникающей радиацией. Астронавтам «Аполлона», с их недельными полетами на Луну, несказанно повезло, что в это время ничего не случилось. Но полет на Марс продлится несколько месяцев; в любом космическом полете принцип один: чем дольше время, тем больше риск.

Более того, существующие технологии не позволяют снабдить космический корабль достаточным для обратного полета запасом топлива. Некоторые изобретатели поговаривают о переработке марсианской воды, чтобы синтезировать ракетное топливо и заполнить баки для обратного полета, но пока это из области мечтаний, причем о весьма отдаленном будущем. Возможно, пока самое логичное решение — то, что так задевает самолюбие НАСА, но активно поддерживается прессой, — полет в один конец. Если бы мы послали экспедицию,

на долгие годы снабдив ее провиантом вместо ракетного топлива, надежным укрытием и теплицей, семенами, кислородом и водой, инструментами для добычи жизненно важных ресурсов на самой Красной планете, такая экспедиция смогла бы состояться. Она была бы немыслимо опасной, но все великие первопроходцы подвергались опасности — таково было кругосветное плавание Магеллана в 1519–1521 гг., экспедиция на Запад Льюиса и Кларка в 1804–1806 гг., полярные экспедиции Пири и Амундсена в начале XX в. Человечество не утратило азартного стремления к участию в таких рискованных предприятиях. Если НАСА объявит о регистрации добровольцев на односторонний полет на Марс, тысячи специалистов запишутся не задумываясь.

Через 50 млн лет Земля все еще будет живой и обитаемой планетой, а ее голубые океаны и зеленые континенты сместятся, но останутся узнаваемыми. Гораздо менее очевидна участь человечества. Может быть, человек вымрет как вид. В этом случае 50 млн лет вполне достаточно для того, чтобы стереть почти все следы нашего краткого владычества — все города, дороги, памятники подвергнутся выветриванию гораздо раньше конечного срока. Каким-нибудь инопланетным палеонтологам придется попотеть, чтобы обнаружить мельчайшие следы нашего существования в приповерхностных отложениях. Однако человек может и выжить, и даже эволюционировать, колонизировать вначале ближайшие планеты, а затем и ближайшие звезды. В таком случае если наши потомки выйдут на космический простор, тогда Земля будет цениться еще выше — как заповедник, музей, святыня и место паломничества. Может быть, только покинув свою планету, человечество, наконец по-настоящему оценит место рождения нашего вида.

Изменение карты Земли: следующий миллион лет

Во многих отношениях через миллион лет Земля не так уж значительно изменится. Конечно, сместятся континенты, но не больше чем на 45–60 км от нынешнего расположения.

Солнце будет светить по-прежнему, всходя каждые двадцать четыре часа, и Луна будет совершать оборот вокруг Земли примерно за один месяц.

Но кое-что изменится весьма основательно. Во многих точках земного шара необратимые геологические процессы преобразуют ландшафт. Особенно заметно изменятся уязвимые очертания берегов океана. Графство Калверт в штате Мэриленд, одно из моих самых любимых мест, где миоценовые скалы с их на вид безграничными запасами окаменелостей тянутся на многие километры, в результате стремительного выветривания исчезнет с лица Земли. Ведь размер всего графства составляет всего 8 км и ежегодно уменьшается почти на 30 см. При такой скорости графство Калверт не продержится и 50 тыс лет, не то что миллион.

Другие государства, напротив, обзаведутся ценными земельными участками. Действующий подводный вулкан неподалеку от юго-восточного побережья самого крупного из Гавайских островов поднялся уже выше 3000 м (хотя по-прежнему покрыт водой) и с каждым годом прибавляет в росте. Через миллион лет из океанских волн поднимется новый остров, уже получивший название Лоихи. В то же время потухшие вулканические острова к северо-западу, включая Мауи, Оаху и Кауаи, соответственно уменьшатся под воздействием ветра и океанских волн.

Что касается волн, специалисты, исследующие горные породы на предмет будущих изменений, приходят к выводу, что самым активным фактором в изменении географии Земли станет наступление и отступление океана. Изменение скорости рифтового вулканизма будет сказываться очень и очень долго, в зависимости от того, насколько больше или меньше лавы будет застывать на океанском дне. Уровень моря может значительно понижаться в периоды затишья вулканической деятельности, когда придонные скалы остывают и успокаиваются: как полагают ученые, именно это и вызвало резкое понижение уровня моря непосредственно перед мезозойским вымиранием. Наличие или отсутствие больших внутренних морей вроде Средиземного, а также сплочение и раскол континентов вызывают

существенные изменения в размерах прибрежных шельфовых участков, что также сыграет важную роль в формировании геосферы и биосферы в течение грядущего миллиона лет.

Миллион лет — это десятки тысяч поколений в жизни человечества, что в сотни раз превышает всю предыдущую человеческую историю. Если человек выживет как вид, то Земля может претерпеть изменения также и в результате нашей прогрессирующей технологической активности, причем такие, что трудно даже себе представить. Но если человечество вымрет, то Земля останется примерно такой же, как теперь. На суше и в море будет продолжаться жизнь; совместная эволюция геосферы и биосферы быстро восстановит доиндустриальное равновесие.

Мегавулканы: следующие 100 тыс. лет

Внезапное катастрофическое столкновение с астероидом меркнет в сравнении с продолжительным извержением мегавулкана или сплошным потоком базальтовой лавы. Вулканизм в планетарном масштабе сопровождал практически все пять массовых вымираний, включая и то, что было вызвано падением астероида.

Последствия мегавулканизма не следует путать с заурядными разрушениями и потерями при извержениях обычных вулканов. Обычные извержения сопровождаются потоками лавы, хорошо знакомыми обитателям Гавайских островов, живущим на склонах Килауэа, чьи жилища и все, что окажется у нее на пути, она разрушает, но в целом такие извержения ограничены, предсказуемы и от них нетрудно уклониться. Несколько более опасны в этой категории заурядных извержения пирокластических вулканов, когда огромное количество раскаленного пепла устремляется вниз по склону горы со скоростью около 200 км/ч, испепеляя и погребая под собой все на своем пути. Именно так обстояло дело в 1980 г. с извержением вулкана Св. Елены, штат Вашингтон, и вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г.; в этих катастрофах погибли бы

тысячи людей, если бы не заблаговременное предупреждение и массовая эвакуация. Еще более грозную опасность представляет третий тип вулканической деятельности: выброс огромных масс мелкого пепла и ядовитых газов в верхние слои атмосферы.

Извержения исландских вулканов Эйяфьяллайокудль (апрель 2010 г.) и Гримсвотн (май 2011 г.) относятся к сравнительно слабым, поскольку сопровождались выбросами менее 4 км^3 пепла. Тем не менее они на несколько дней парализовали воздушное сообщение в Европе и нанесли вред здоровью многих людей из близлежащих местностей. В июне 1783 г. извержение вулкана Лаки — одно из крупнейших в истории — сопровождалось выбросом более 12 тыс. м^3 базальта, а также пепла и газа, что оказалось вполне достаточно, чтобы надолго окутать Европу ядовитой мглой. При этом погибла четверть населения Исландии, часть из которых скончалась от непосредственного отравления кислотными вулканическими газами, а большинство — от голода в течение зимы. Последствия катастрофы сказались на расстоянии более тысячи километров в сторону юго-востока, и десятки тысяч европейцев, в основном жителей Британских островов, умерли от затяжного воздействия этого извержения. Но самым смертоносным было извержение вулкана Тамбора в апреле 1815 г., в ходе которого было выброшено более 20 км^3 лавы. При этом погибли более 70 тыс. человек, большинство из них от массового голода, возникшего в результате урона, нанесенного сельскому хозяйству. Тамборское извержение сопровождалось выбросом огромных масс сернистых газов в верхние слои атмосферы, что привело к блокированию солнечных лучей и ввергло Северное полушарие в «год без солнечного света» («вулканическую зиму») в 1816 г.

Эти исторические события до сих пор поражают воображение, и не без причины. Конечно, число жертв не идет ни в какое сравнение с сотнями тысяч людей, погибших от недавних землетрясений в Индийском океане и на Гаити. Но между извержениями вулканов и землетрясениями существует важ-

ное, пугающее различие. Размер мощнейшего из возможных землетрясений ограничен прочностью породы. Твердая порода может выдержать определенное давление, прежде чем расколется; прочность породы может вызвать весьма разрушительное, но все же локальное землетрясение — магнитудой девять баллов по шкале Рихтера.

В отличие от этого извержения вулканов не имеют ограничений в масштабе. На самом деле геологические данные неопровержимо свидетельствуют об извержениях, в сотни раз более мощных, чем вулканические катастрофы, сохраненные исторической памятью человечества. Такие гигантские вулканы могли на годы затмевать небо и на многие миллионы (не на тысячи!) квадратных километров изменять облик земной поверхности. Гигантское извержение вулкана Таупо на Северном острове, Новая Зеландия, произошло 26 500 лет назад; было извергнуто более 830 км^3 магматической лавы и пепла. Вулкан Тоба на Суматре взорвался 74 000 лет назад и изверг более 2800 км^3 лавы. Последствия аналогичной катастрофы в современном мире трудно представить.

И все же эти супервулканы, породившие величайшие катаклизмы в истории Земли, меркнут по сравнению с гигантскими потоками базальта (ученые называют их «траппы»), обусловившими массовые вымирания. В отличие от одноразовых извержений супервулканов потоки базальта охватывают огромный временной период — тысячи лет беспрерывной вулканической активности. Мощнейшие из таких катаклизмов, как правило, совпадающих с периодами массового вымирания, распространяли сотни тысяч миллионов кубических километров лавы. Самая крупная катастрофа произошла в Сибири 251 млн лет назад во время великого массового вымирания и сопровождалась растеканием базальта на площади более миллиона квадратных километров. Гибель динозавров 65 млн лет назад, которая часто приписывается столкновению с крупным астероидом, совпала по времени с гигантским разливом базальтовой лавы в Индии, породившим крупнейшую магматическую провинцию Деканские Траппы, общая площадь кото-

рых составляет около 517 000 км^2, а объем выросших гор достигает 500 000 км^3.

Эти громадные территории не могли образоваться в результате простого преобразования коры и верхней части мантии. Современные модели базальтовых формаций отражают представление о древнейшей эпохе вертикальной тектоники, когда гигантские пузыри магмы медленно поднимались от границ раскаленной сердцевины мантии, раскалывая земную кору и выплескиваясь на холодную поверхность. Такие явления в наше время случаются крайне редко. Согласно одной из теорий, между потоками базальтов временной интервал составляет примерно 30 млн лет, так что вряд ли мы доживем до следующего.

Наше технологическое общество, безусловно, получит своевременное предупреждение о возможности такого события. Сейсмологи способны отследить поток горячей, расплавленной магмы, восходящей к поверхности. В нашем распоряжении могут быть сотни лет, чтобы подготовиться к такому стихийному бедствию. Но если человечество попадет в очередной всплеск вулканизма, мы мало что сможем противопоставить этому жесточайшему из земных испытаний.

Фактор льда: следующие 50 тыс. лет

В обозримом будущем самым существенным фактором, определяющим облик земных континентов, является лед. В течение нескольких сотен тысяч лет глубина океана в сильной степени зависит от общеземного объема замерзшей воды, включая ледяные шапки гор, ледники и континентальные ледовые щиты. Уравнение несложное: чем больше объем замерзшей воды на суше, тем ниже уровень воды в океане.

Прошлое — это ключ к прогнозированию будущего, но откуда нам знать глубину древних океанов? Результаты наблюдения с помощью спутников за уровнем воды в океанах, хотя они и невероятно точные, ограничены последними двумя десятилетиями. Измерения уровня моря уровнемерами, хотя менее

точные и подверженные местным отклонениям, собраны за последние полтора столетия. Геологи, исследующие побережья, могут прибегнуть к картированию признаков расположения береговой линии в древности — например, приподнятых береговых террас, которые можно обнаружить по отложениям прибрежно-морских осадков, насчитывающих десятки тысяч лет, — такие приподнятые участки могут отражать периоды повышения уровня воды. Относительное положение ископаемых кораллов, которые обычно растут в зоне прогреваемого солнцем мелководного океанского шельфа, могли бы продлить нашу запись событий былого вглубь веков, но эта запись будет искажена, так как такие геологические образования эпизодически вздымаются, погружаются и наклоняются.

Многие специалисты стали обращать внимание на менее очевидный показатель уровня моря — на изменения соотношений изотопов кислорода в мелких раковинах морских моллюсков. Такие соотношения могут рассказать гораздо больше, чем расстояние между каким-либо небесным телом и Солнцем (см. главу 2). Благодаря своему свойству реагировать на смену температур изотопы кислорода дают ключ к расшифровке объемов ледяного покрова Земли в прошлом и соответственно — к изменению уровня воды в древнем океане.

Однако связь между количеством льда и изотопами кислорода — дело мудреное. Считается, что самым распространенным изотопом кислорода, составляющим 99,8% кислорода воздуха, которым мы дышим, является легкий кислород-16 (с восемью протонами и восемью нейтронами). Один на 500 атомов кислорода — тяжелый кислород-18 (восемь протонов и десять нейтронов). Это означает, что одна из каждых 500 молекул воды в океане тяжелее обычных. Когда океан нагревается от солнечных лучей, вода, содержащая легкие изотопы кислорода-16, испаряется быстрее, чем с кислородом-18, а потому вес воды в низкоширотных облаках легче, чем в самом океане. По мере того как облака поднимаются в более прохладные слои атмосферы, вода с тяжелым кислородом-18 конденсируется в дождевые капли быстрее более лег-

кой воды с изотопом кислорода-16, и кислород в составе облака становится еще легче.

В процессе неизбежного перемещения облаков к полюсам кислород в составляющих их молекулах воды становится намного легче, чем в морской воде. Когда над полярными ледниками и ледниками выпадают осадки, легкие изотопы застывают во льду и морская вода становится еще тяжелее. В периоды максимального охлаждения планеты, когда более 5% земной воды превращается в лед, морская вода становится особенно насыщенной тяжелым кислородом-18. В периоды глобального потепления и отступления ледников уровень кислорода-18 в морской воде снижается. Таким образом, тщательные измерения соотношения изотопов кислорода в прибрежных осадочных породах могут дать представление об изменениях объема поверхностного льда в ретроспективе.

Именно этими исследованиями и занимается геолог Кен Миллер с коллегами в Университете Ратгерса уже несколько десятков лет, изучая мощные слои морских осадков, покрывающих побережье в Нью-Джерси. Эти отложения, в которых записана геологическая история последних 100 тыс. лет, насыщены раковинами микроскопических ископаемых организмов, называемых фораминиферами. Каждая крошечная фораминифера хранит в своем составе изотопы кислорода в той пропорции, какая была в океане в то время, когда организм вырастал. Измерение изотопов кислорода в береговых отложениях Нью-Джерси, слой за слоем, предоставляет простое и точное средство для оценки объема льда в соответствующий период времени.

В недавнем геологическом прошлом ледяной покров то уменьшался, то разрастался, что сопровождалось соответствующими значительными колебаниями уровня моря каждые несколько тысяч лет. На пике ледниковых периодов более 5% воды на планете превращалось в лед, понижая уровень моря метров на сто относительно современного. Считается, что около 20 тыс. лет назад, в один из таких периодов низкого стояния воды образовался сухопутный перешеек через

Берингов пролив между Азией и Северной Америкой — именно по этому «мосту» в Новый Свет мигрировали люди и другие млекопитающие. В тот же самый период не существовало Ла-Манша, и между Британскими островами и Францией пролегала сухая долина. В периоды максимального потепления, когда ледники практически исчезали, а на вершинах гор истончались снежные шапки, уровень моря повышался, становясь примерно на 100 м выше современного, погружая под воду сотни тысяч квадратных километров прибрежных территорий по всей планете.

Миллер и его сотрудники вычислили более сотни циклов наступания и отступания ледников за последние 9 млн лет, и по меньшей мере дюжина из них приходится на последний миллион — диапазон этих бешеных колебаний уровня океана достигал 180 м. Один цикл может слегка отличаться от другого, но события происходят с очевидной периодичностью и связаны с так называемыми циклами Миланковича, именованными так в честь сербского астронома Милутина Миланковича, который обнаружил их примерно столетие назад. Он выяснил, что хорошо известные изменения параметров движения Земли вокруг Солнца, включая наклон земной оси, эксцентриситет эллиптической орбиты и незначительное колебание собственной оси вращения, обусловливают периодические изменения в климате с промежутками от 20 тыс. лет до 100. Эти сдвиги воздействуют на поток солнечной энергии, достигающий Земли, и таким образом вызывают значительные колебания климата.

Что же ожидает нашу планету в ближайшие 50 тыс. лет? Можно не сомневаться, что резкие колебания уровня моря продолжатся, и не раз он то опустится, то поднимется. Иногда, вероятно, в течение следующих 20 тыс. лет, снежные шапки на вершинах буду расти, ледники продолжат увеличиваться, а уровень моря опустится метров на шестьдесят или более — до такого уровня море опускалось не менее восьми раз за последний миллион лет. Это окажет мощное воздействие на очертания континентальных береговых линий. Восточное

побережье США расширится на много километров в восточном направлении, по мере того как будет обнажаться мелководный материковый склон. Все крупные гавани Восточного побережья, от Бостона до Майами, превратятся в сухие внутренние плоскогорья. Аляску соединит с Россией новый покрытый льдом перешеек, а Британские острова могут снова стать частью материковой Европы. Богатые рыбные промыслы вдоль континентальных шельфов станут частью суши.

Что касается уровня моря, если он понижается, то затем непременно должен повыситься. Вполне возможно, даже очень вероятно, что через следующую тысячу лет уровень моря поднимется на 30 м и выше. Такой подъем уровня Мирового океана, довольно скромный по геологическим меркам, неузнаваемо перекроит карту Соединенных Штатов. Тридцатиметровый подъем уровня моря приведет к затоплению большей части прибрежных равнин на Восточном побережье, сдвинув береговые линии до полутора сотен километров в западном направлении. Главные прибрежные города — Бостон, Нью-Йорк, Филадельфия, Вашингтон, Балтимор, Уилмингтон, Чарльстон, Саванна, Джексонвилл, Майами и многие другие — окажутся под водой. Лос-Анджелес, Сан-Франциско, Сан-Диего и Сиэтл исчезнут в морских волнах. Затопит почти всю Флориду, на месте полуострова раскинется мелководное море. Под водой окажется большая часть штатов Делавэр и Луизиана. В других частях света урон, нанесенный подъемом уровня моря, окажется еще более опустошительным. Перестанут существовать целые страны — Голландия, Бангладеш, Мальдивы.

Геологические данные неопровержимо свидетельствуют: подобные изменения будут происходить и впредь. Если потепление окажется стремительным, как полагают многие эксперты, уровень воды будет подниматься быстро, примерно на 30 см за десятилетие. Обычное тепловое расширение морской воды во время периодов глобального потепления способно увеличить подъем уровня моря в среднем до трех метров. Несомненно, это станет проблемой для человечества, но окажет весьма незначительное воздействие на Землю.

Все же это не станет концом света. Это станет концом нашего мира.

Потепление: следующие сто лет

Большинство из нас не заглядывает на несколько миллиардов лет вперед, как не заглядывает на несколько миллионов лет или даже на тысячу лет. Нас беспокоят более насущные заботы: как мне оплатить высшее образование для ребенка через десять лет? Получу ли я повышение по службе через год? Пойдет ли на следующей неделе рынок акций вверх? Что приготовить на обед?

В этом контексте нам незачем волноваться. Исключая непредвиденную катастрофу, наша планета через год, через десять лет почти не изменится. Любая разница между тем, что есть сейчас, и тем, что будет через год, почти незаметна, даже если лето окажется небывало жарким, или урожай пострадает от засухи, или налетит необычайно сильная буря.

Несомненно одно: Земля продолжает меняться. Есть много признаков грядущего глобального потепления и таяния ледников, возможно, отчасти ускоренного деятельностью человека. В течение следующего столетия последствия этого потепления коснутся многих людей в самых разных аспектах.

Летом 2007 г. я участвовал в Симпозиуме по проблемам будущего в рыбацком поселке Илулиссат на западном побережье Гренландии, почти у Северного полярного круга. Выбор места для обсуждения будущего был весьма удачный, так как изменения климата происходили непосредственно за пределами конференц-зала в уютном отеле «Арктика». На протяжении тысячи лет эта гавань, расположенная вблизи отрога могучего Илулиссатского ледника, являлась местом прибыльного рыболовецкого промысла. Тысячу лет рыбаки зимой, когда гавань замерзала, занимались подледным ловом. То есть занимались до начала нового тысячелетия. В 2000 г. впервые (по крайней мере согласно тысячелетней устной истории) гавань не замерзла зимой. Могучий ледник, объект природ-

ного наследия, отступает с поразительной скоростью — почти 9 км за три года после многих десятилетий стабильного состояния. Еще одно изменение: тысячу лет в Илулиссате и близлежащих поселках не водились насекомые-паразиты, но в 2007 г. и во все последующие годы в августе появлялись тучи комаров и мошки. Можно считать это забавной мелочью, но насекомые являются несомненными предвестниками неизбежных и значительных перемен.

И такие перемены наблюдаются по всему земному шару. С берега Чезапик-Бэй сообщают об устойчивом повышении уровня прилива по сравнению с предыдущими десятилетиями. Год за годом Сахара распространяется все дальше на север, превращая некогда плодородные сельскохозяйственные угодья Марокко в пыльную пустыню. Стремительно тают и раскалываются льды Антарктиды. Средние температуры воздуха и воды постоянно растут. Все это отражает процесс последовательного глобального потепления — процесс, который Земля переживала уже бессчетное число раз в прошлом и будет испытывать в будущем.

Потепление может сопровождаться и другими, порой парадоксальными эффектами. Гольфстрим, мощное океанское течение, несущее теплую воду от экватора к Северной Атлантике, управляется большой разницей температур между экватором и высокими широтами. Если в результате глобального потепления контраст температур уменьшится, как следует из некоторых моделей климата, то Гольфстрим может ослабеть или вовсе остановиться. По иронии судьбы, непосредственным результатом этого изменения станет превращение умеренного климата Британских островов и Северной Европы, которые сейчас обогреваются Гольфстримом, в гораздо более прохладный. Аналогичные перемены произойдут и с другими океанскими течениями — например, с течением, идущим из Индийского океана в Южную Атлантику мимо Африканского Рога, — это может вызвать похолодание мягкого климата Южной Африки или изменение муссонного климата, обеспечивающего часть Азии плодородными дождями.

Когда ледники тают, уровень моря повышается. По самым скромным расчетам, он повысится на полметра-метр в следующем столетии, хотя, по некоторым данным, в отдельные десятилетия рост уровня морской воды может колебаться в пределах нескольких сантиметров. Такие изменения уровня моря затронут множество жителей прибрежных территорий по всему миру и станут настоящей головной болью для инженеров-строителей и владельцев пляжных участков от Мэна до Флориды, но в принципе с подъемом до одного метра в густонаселенных прибрежных зонах можно справиться. По крайней мере ближайшие одно-два поколения жителей могут не беспокоиться о наступлении моря на сушу.

Однако отдельные виды животных и растений могут пострадать гораздо серьезнее. Таяние полярных льдов на севере уменьшит зону обитания белых медведей, что весьма неблагоприятно для сохранения популяции, численность которой и без того сокращается. Стремительный сдвиг климатических зон по направлению к полюсам отрицательно скажется на других видах, прежде всего на птицах, которые особенно восприимчивы к переменам в сезонной миграции и кормовых зонах. Согласно некоторым данным, средний прирост температуры на планете всего на пару градусов, что предполагает большинство климатических моделей грядущего столетия, может сократить поголовье птиц почти на 40% в Европе и более чем на 70% в благодатных дождевых лесах северо-восточной Австралии. Серьезный международный доклад говорит, что из примерно шести тысяч видов лягушек, жаб и ящериц каждый третий окажется в опасности, главным образом из-за спровоцированного теплым климатом распространения грибкового заболевания, смертельно опасного для амфибий. Какие бы еще следствия потепления ни обнаружились в грядущем столетии, похоже, что мы вступаем в период ускоренного вымирания.

Некоторые преобразования в следующем столетии, неизбежные или только вероятные, могут оказаться мгновенными, будь то крупное разрушительное землетрясение, извер-

жение супервулкана или падение астероида диаметром более километра. Зная историю Земли, мы понимаем, что такие события обычны, а значит, неизбежны в масштабах планеты. Тем не менее строим города на склонах действующих вулканов и в самых геологически активных зонах Земли в надежде на то, что мы увернемся от «тектонической пули» или «космического снаряда».

Между очень медленными и стремительными переменами находятся геологические процессы, на которые обычно уходят столетия или даже тысячелетия, — изменения климата, уровня моря и экосистем, которые могут оставаться незаметными в течение нескольких поколений. Главной угрозой являются не сами изменения, а их степень. Ибо состояние климата, положение уровня моря или само существование экосистем может достичь критического уровня. Ускорение процессов положительной обратной связи может неожиданно ударить по нашему миру. То, на что обычно требуется тысячелетие, может проявиться через десяток-другой лет.

Легко пребывать в благодушном настроении, если неправильно прочтешь летопись горных пород. Некоторое время, до 2010 г., беспокойство по поводу современных событий умерялось исследованиями, взирающими на 56 млн лет назад — время одного из массовых вымираний, резко повлиявшего на эволюцию и распространение млекопитающих. Это грозное явление, называемое позднепалеоценовым термическим максимумом, вызвало сравнительно резкое исчезновение тысяч видов. Изучение термического максимума важно для нашего времени, поскольку это самый известный в истории Земли, документально подтвержденный резкий сдвиг температур. Вулканическая деятельность вызвала относительно быстрое увеличение содержания в атмосфере углекислого газа и метана, двух неразлучных парниковых газов, что, в свою очередь, привело к появлению положительной обратной связи, которая продержалась более тысячи лет и сопровождалась умеренным глобальным потеплением. Некоторые исследователи усматривают в позднепалеоценовом термическом максимуме явную

параллель с современной ситуацией, разумеется, неблагоприятной — с подъемом глобальной температуры в среднем почти на 10 °C, стремительным повышением уровня моря, окислением океанов и значительным смещением экосистем по направлению к полюсам, однако не столь катастрофической, чтобы угрожать выживанию большинства животных и растений.

Потрясение от недавних находок Ли Кемпа, геолога из Университета штата Пенсильвания, и его коллег практически лишило нас всякого повода для оптимизма. В 2008 г. команда Кемпа получила доступ к материалам, добытым в результате бурения в Норвегии, которые позволили детально проследить события позднепалеоценового термического максимума — в осадочных породах, слой за слоем, запечатлены тончайшие подробности скорости изменения содержания углекислого газа в атмосфере и климата. Плохие новости заключаются в том, что термальный максимум, который более десятилетия считался самым быстрым климатическим сдвигом в истории Земли, был обусловлен изменениями в составе атмосферы, по интенсивности в десять раз уступавшими тому, что происходит сегодня. Глобальные изменения в составе атмосферы и средняя температура, сформированные в течение тысячи лет и в итоге приведшие к вымиранию, в наше время произошли в течение последних ста лет, за которые человечество сожгло громадные количества углеводородного топлива.

Это беспрецедентно быстрое изменение, и никто не может предсказать, как на это отреагирует Земля. На Пражской конференции в августе 2011 г., где собрались три тысячи геохимиков, царило весьма грустное настроение среди специалистов, отрезвленных новыми данными позднепалеоценового термического максимума. Конечно, для широкой публики прогноз этих экспертов был сформулирован в довольно осторожных выражениях, однако комментарии, которые я слышал в кулуарах, носили весьма пессимистический, даже устрашающий характер. Концентрация парникового газа увеличивается слишком быстро, а механизмы поглощения этого избытка неизвестны. Не вызовет ли это массированного выброса

метана со всеми последующими положительными обратными связями, которые влечет за собой такое развитие событий? Поднимется ли уровень моря на сотню метров, как уже не раз происходило в прошлом? Мы вступаем в зону terra incognita, осуществляя плохо продуманный эксперимент в глобальном масштабе, подобного которому Земле не доводилось переживать в прошлом.

Судя по данным горных пород, сколь бы устойчивой к потрясениям ни была жизнь, биосфера в переломные моменты внезапных климатических сдвигов находится в сильном напряжении. Биологическая продуктивность, в частности сельскохозяйственная, на какое-то время упадет до катастрофического уровня. В быстро меняющихся условиях крупные животные, в том числе человек, заплатят дорогую цену. Взаимозависимость горных пород и биосферы не ослабеет, но роль человечества в этой саге, продолжительностью в миллиарды лет, остается непостижимой.

Может быть, мы уже достигли переломного момента? Возможно, не в текущем десятилетии, возможно, вообще не при жизни нашего поколения. Но такова уж природа переломных моментов — мы распознаем такой момент только тогда, когда он уже наступит. Финансовый пузырь лопается. Население Египта поднимает мятеж. Биржа терпит крах. Мы осознаем то, что происходит, только в ретроспективе, когда уже слишком поздно восстанавливать status quo. Да и не было в истории Земли такого восстановления.

Эпилог

Меняется климат, меняется уровень моря, меняются дожди и ветра, меняется жизнь на суше и в море. Горные породы и жизнь продолжают сосуществовать, как и миллиарды лет назад. Человек не в состоянии предотвратить глобальное изменение климата, как и неспособен изменить орбиту Земли в космическом пространстве.

Мы не можем ни уничтожить жизнь на Земле, ни остановить ее неуклонную эволюцию. Жизнь находит убежище во всех уголках планеты. Жизнь продолжается в арктических льдах, в кислотных водоемах, в недрах Земли и на пылинках, уносимых ветром в высокие слои атмосферы. Какую бы глупость мы ни сотворили — например, вызвали повышение температуры на десяток градусов, или отравили воздух и воду, или истребили запасы рыбы в море, или даже развязали мировую термоядерную войну, — жизнь не прекратится. Человечество может навсегда исчезнуть как вид, но это вряд ли затронет микроорганизмы. Еще миллиарды лет Земля будет совершать суточный оборот вокруг своей оси и годичную одиссею вокруг Солнца. В течение миллиардов лет Земля будет оставаться живой планетой, миром голубых океанов, зеленых континентов и белых парящих облаков. На взгляд из космоса, Земля останется такой же красивой, как сегодня, — с человечеством или без него.

Но не заблуждайтесь. Вне всяких сомнений, деятельность человека за последнее столетие спровоцировала резкие изменения в составе атмосферы, а потому, по законам физики, неизбежно изменится климат. Концентрация углекислого газа и метана, двух эффективных парниковых газов, достигла уровня, беспрецедентного за предыдущие сотни миллионов лет. Эти изменения усугубляются ускоренным вырубанием тропи-

ческих дождевых лесов, избыточным потреблением морских биологических ресурсов и неуклонным разрушением мест обитания по всему миру. Именно из-за действий человека климат на Земле теплеет, льды тают, уровень моря повышается. Но все это для Земли не ново. Почему же нам следует беспокоиться о том, что человеческая деятельность ускоряет ход изменений?

Во-первых, представьте себе, какие беды обрушатся на человечество, если морских животных постигнет массовая гибель, а продукция сельского хозяйства внезапно уменьшится наполовину. Что произойдет, если более миллиона квадратных километров плодородных сельскохозяйственных угодий будет затоплено, морские порты уйдут под воду и исчезнут средства к существованию? Неисчислимые страдания обрушатся на миллиарды людей, утративших кров и привычную среду обитания.

Если нам и стоит беспокоиться, то отнюдь не «о спасении планеты». За многие миллиарды лет наша планета пережила столько непомерных катаклизмов, что спасется и без нас. Возможно, некоторые высоконравственные люди сосредоточат свои усилия в попытке спасти китов или белых медведей, обреченных, как это ни печально, на вымирание. Но даже исчезновение этих крупных животных, а также слонов, панд и носорогов или миллиона других видов животных, не менее нас достойных сострадания, для Земли будет означать только временную потерю. Вместо вымерших неизбежно появятся новые замечательные животные, на что уйдет всего лишь геологическое мгновение, и заполнят свободные ниши — возможно, в пределах одного миллиона лет. Крупные млекопитающие вроде человека могут исчезнуть с лица Земли, но другие позвоночные, например птицы, займут их место. Возможно, многие ниши займут пингвины, которые, как выясняется, способны стремительно адаптироваться и развиваться: появятся пингвины-киты, пингвины-тигры или пингвины-лошади. Возможно даже, у пингвинов разовьется достаточно большой мозг и хватательные пальцы. Что бы мы ни делали, Земля останется пестрым, разнообразным живым миром.

Нет, если уж о чем-то беспокоиться, то прежде всего — о сохранении и выживании самого человека как вида, потому что именно человек в первую очередь подвергается опасности. Земля — это огромная веялка, отсеивающая все лишнее и ошибочное. Жизнь продолжит свое величавое существование, но человечество, по крайней мере в нынешнем его состоянии, может и не выстоять. Нас может ожидать весьма печальная участь: либо наша бездумная деятельность, либо не менее бездумная бездеятельность навлечет на нас гибельные последствия. Пока мы продолжаем с нарастающей быстротой изменять окружающий мир — нашу «бледно-голубую точку», по выражению Карла Сагана, — остается все меньше и меньше времени для принятия эффективных мер.

Земля отнюдь не безмолвствует; ее история подробно изложена в летописи горных пород. Тысячелетиями мы проявляли достаточное благоразумие, изучая эту историю и пытаясь освоиться в собственном земном доме. Остается лишь надеяться на то, что мы усвоим урок вовремя.

Благодарности

Десятки друзей и коллег внесли свой вклад в замысел этой книги и его осуществление. Я в особенном долгу перед четырьмя учеными, которые с энтузиазмом приняли идею минеральной эволюции еще на ранней стадии, в 2008 г. Минералог Роберт Даунс, мой давний друг и коллега, предоставил в мое распоряжение свой колоссальный опыт по исследованию свойств и географии минералов. Петролог Джон Ферри из Университета Джона Хопкинса, товарищ со студенческих лет, разработал сложную теоретическую базу для нового подхода к минералогии. Геобиолог Доминик Папино, бывший докторант Геофизической лаборатории, а ныне преподаватель Бостонского колледжа, с самого начала являлся сторонником модели минеральной эволюции и способствовал ее развитию придирчивой, но доброжелательной критикой, невзирая на все возражения со стороны своих руководителей в Институте Карнеги. Геохимик Димитрий Сверженский из Университета Джона Хопкинса, мой ближайший коллега по профессии в течение многих лет, делился со мной мыслями и идеями, способствовавшими развитию модели минеральной эволюции. Эти четверо друзей стояли у истоков теории минеральной эволюции и внесли как теоретический, так и практический вклад в ее разработку. Без их помощи эта книга не состоялась бы.

Неоценимый вклад внесли и многие другие: геолог — специалист по докембрийской эпохе Вутер Блейкер из Геологической службы Канады, эксперт по метеоритам Тимоти Маккой из Смитсоновского института, крупный специалист в области биоминералогии Хосен Ян из Университета Аризоны. Они интересовались идеей, начиная с первых публикаций. В последующем к нашему сообществу присоединились Дэвид Аззолини, Андрей Беккер, Дэвид Биш, Родни Юинг, Джеймс Фаркуар,

Джошуа Голден, Эндрю Ноул, Мелисса Макмиллан, Джолион Ральф и Джон Вэлли, помогая развивать идею и подсказывая новые увлекательные направления. Я особенно признателен Эдварду Гру, чьи исследования эволюции редких элементов бериллия и бора позволили подняться на более высокий уровень количественного анализа.

Книга не была бы написана, если бы не поддержка коллег из области исследований происхождения жизни. Выражаю особую благодарность Гендерсону Джеймсу Кливзу, Кристоферу Йонссону, Нэмхи Ли, Катарине Клочко, Сохеи Оно и Адриану Вильегас-Хименесу. Я получил неизмеримо много от сотрудничества с палеонтологом из Гарварда Эндрю Ноулом и его коллегами, прежде всего с Чарльзом Кевином Бойсом и Норой Ноффке, а также с Нилом Гупта.

Я пользовался неослабевающей поддержкой своих коллег: Конни Бертка, Андреа Магнум, Лорен Крайан из Обсерватории Дип-Карбон, а также Джесси Аусубел из Фонда Слоуна, благодаря которому мы получили щедрое финансирование, позволившее начать этот проект. Они приняли на себя решение многих организационных проблем, которые могли бы отвлечь меня от работы над этой книгой. Мои коллеги из Университета Джорджа Мейсона, особенно Ричард Дьеччио, Гарольд Моровитц и Джеймс Трефил, участвовали во множестве дискуссий в процессе разработки теории минеральной эволюции. Я также признателен Расселу Хемли, директору Геофизической лаборатории, от которого постоянно получал безоговорочную поддержку и содействие в осуществлении проекта.

Многие ученые давали бесценные советы и информацию во время исследования, проводимого для этой книги. Я благодарю Роберта Бланкеншипа, Алана Босса, Джохена Брокса, Дональда Кенфилда, Линду Элкинс-Тантон, Эрика Хаури Линду Ках, Линн Маргулис, Кена Миллера, Ларри Ниттлера, Питера Олсона, Джона Роджерса, Хендрика Шатца, Скотта Шепарда, Стива Шири, Роджера Саммонса и Мартина ван Кранендонка.

Настоящее издание много выиграло от вдумчивых комментариев и поправок Ариэля Анбара, Криса Маккея и Брюса

Шервуда. Я признателен редакционно-издательскому коллективу Viking за энтузиазм и профессионализм в подготовке к печати этой книги. Первой одолела книгу Алессандра Лузарди и внесла ряд критических замечаний на стадии подготовки. Лиз Ван Хуз обеспечила бесценную помощь в редактировании и довела книгу до окончательной стадии с неизменной творческой отдачей и мягким юмором. Я также хотел бы поблагодарить Брюса Гиффордса и Джанет Бил.

Замысел этой работы воплощался в жизнь в сотрудничестве с дизайнером Эриком Лупфером из агентства William Morris Endeavor, который провел вдумчивый анализ книги, дал свое временные советы и оказывал постоянную поддержку на каждой стадии проекта. Я перед ним в неоплатном долгу.

Маргарет Хейзен помогает мне на протяжении всего периода разработки теории минеральной эволюции, начав задолго до ее первого озвучивания 6 декабря 2006 г. и заканчивая презентацией данной книги. Ее внимательность и заразительный энтузиазм, обоснованные советы и резкая критика всех моих рукописей, а также живая непосредственность и неназойливое сочувствие мне во всех успехах и провалах на протяжении моей напряженной научно-исследовательской деятельности позволили воплотить этот проект в жизнь.

Предметный указатель

А

Австралия 226, 278, 307, 309
Адам, библейский персонаж 44
Азия 220
Азот 23–25, 39, 55, 98–100, 117, 152, 157, 162, 170, 181, 182, 196, 213, 236, 266
Айсберг 103, 128, 137
Акулы 42, 292
Алмазная камера 256
Алмазная наковальня 114, 238
Алмазы 115
Альбедо 251
Альпы 139, 307
Алюминий 23, 25, 74, 76–80, 85, 89, 92, 99, 126, 153
Амазия. *См. также* Новопангея 306, 309
Амазония 249
Аминокислоты 162, 167, 168, 172, 182
Аммиак 24, 172, 237
Аммониты 284, 298, 299
Амфибии 292, 295, 298, 326
Анбар, Ариэль 212, 213, 237, 335
Анды 139
Антарктида 12, 28, 29, 32, 43, 133, 146, 161, 229, 233, 278, 297, 306–309, 325
Антиатлас, горы 282
Аполлон 49–55, 57, 58, 64, 109, 313
Аппалачи, горы 43, 277
Аргон 45
Арктика, отель 324
Армстронг, Нейл 51
Асбест 76, 246
Астероиды 21, 26, 34, 37, 38, 48, 70, 80, 91, 105, 130, 131, 161, 162, 178, 293, 296, 299, 300, 303, 309, 310–312, 316, 318, 327
Атлантический океан 132, 135, 143, 144, 221, 275, 278, 298, 307, 308, 309
Атомы 15, 20, 21, 24, 26, 44, 74, 77, 78, 80, 81, 87, 98, 100, 101, 113, 118, 157, 168, 179, 180, 188, 192, 194, 214, 215
Африканская плита 147
Ахондриты 29, 32, 34, 39

Б

Базальт 8, 27, 34, 71, 84, 90–94, 96, 117, 118, 121, 122, 125–130, 140–144, 146, 148–152, 165, 213, 219, 222, 249, 291, 296, 307, 316–319
Бактериальные маты 204, 205, 207–210, 230
Балтика 228, 233, 249
Баргхорн, Элсо 205
Берилл 240
Бериллий 99, 126, 219, 240, 241, 335
Берингов пролив 322
Беспозвоночные 291
Биогенез 158, 163, 169, 258

Биомолекулы 158, 160, 163, 167, 182, 192, 200, 202, 204, 206, 208, 268
Биосфера 9, 124, 154, 166, 178, 179, 181, 183, 211, 230, 259, 260, 266, 267, 275, 276, 279, 296, 298, 316, 329
Бирюза 211
Бланкеншип, Роберт 193, 335
Бойс, Кевин 288–290, 335
Большой Барьерный риф, Австралия 14
Большой взрыв 22
Брокс, Джокен 202–204, 335
Бьюик, Роджер 217

В

Ваальбара, суперконтинент 226
Вадслеит 87, 116
Ван Гельмонт, Ян Баптиста 190, 191
Вегенер, Альфред 133–135, 139, 143
Великое вымирание 294, 296, 297
Великое кислородное событие 185–187, 210, 214, 217, 220, 234, 235, 241, 266, 276, 293
Венера 27, 36, 39, 58, 59, 63, 69, 71, 74, 91, 105, 125, 153, 247, 305
Вертикальная тектоника 129–131, 150, 151, 319
Вечная мерзлота 107, 257, 273
Водород 15, 20–22, 24–27, 36, 39, 55, 72, 73, 99, 101, 103, 105, 108, 109, 111, 113, 116, 121, 125, 153, 157, 170, 194, 195, 212, 260, 304–306
Воунз, Дэвид 51, 91
Выветривание 122, 268, 291
Вымирания 294, 296, 299, 300, 318, 326

Г

Габбро 93
Гавайские острова 13, 14, 43, 51, 315, 316
Ганимед 38
Гаскиерское оледенение 263
Гафний 33
Гейзеры 81, 96, 117, 130, 160, 162–165
Гелий 15, 20–22, 24, 26, 27, 36, 39, 72, 73, 105, 125, 304
Гематит 77, 180
Геосфера 181, 211, 230, 266, 267, 296, 316
Гидроний, йоны 104, 112, 121
Гидроны 103
Гидротермальные 122, 162, 167, 254, 264
Гималаи 139, 307
Голд, Томас (Томми) 258, 259
Гольфстрим 59, 325
Гоминиды 301
Гондвана 277, 278
Гопаноиды 182, 202–204
Госсе, Филип 44
Гравитация 15, 21, 22, 25, 26, 34–40, 45, 46, 48, 49, 61–63, 67, 69, 194, 304
Гранат 75, 77, 113
Гранит 125–130, 148–153, 165, 213, 220, 222, 224, 291
Графит 25, 210
Гренландия 12, 14, 43, 133, 201, 205, 210, 223, 228, 277, 297, 324
Гротцингер, Джон 230
Гру, Эд 240, 241, 335
Губки 280
Гудзон, река 93
Гулд, Стивен Джей 283

Д

Дарвин, Джордж Говард 49, 57, 132
Дарвин, Чарльз 49, 155, 159
Двухвалентное железо 77, 78
Деймос 48
Дейтерий 261
Джефферсон, Томас 28
Джеффриз, Гарольд 135
Джоггинс, Новая Шотландия 284
Джойс, Джеральд 155, 156
Диабаз 93
Димер, Дэвид 164
Динозавры 41, 42, 70, 72, 287, 297–300, 310, 311, 318
ДНК 154, 155, 157, 165, 166, 173, 174, 182, 203, 245, 266, 270
Доушаньто, формация 271, 280
Дунит 85, 86

З

Западно-Африканский кратон 249
Зимбабве, кратон 223
Золото 23, 99, 102, 187

И

Известняк 14, 140, 181, 183, 206, 207, 224, 236, 250, 253, 256, 281, 282, 285, 291
Изотопологи 261
Индия 133, 221, 223, 226, 267, 277, 278, 299, 318
Инфракрасная спектроскопия 115
Ио 38
Ионный микрозонд 109
Исландия 92, 317

Й

Йеллоустоун 90
Йилгарн, кратон 223
Йодер, Хаттен «Хат», мл. 83, 84, 114

К

Каапвааль, кратон 223
Калахари, кратон 249
Калий 126
Калифорнийское океанское течение 111
Калифорния 111, 143, 147, 188, 197, 260, 268
Каллисто 105
Кальций 23, 25, 74, 76, 78, 79, 85, 89, 92, 99, 104, 121, 126, 152, 153, 256, 280
Кальцит 256
Камен, Мартин 191
Канада 140, 201, 223, 231, 256, 257, 266, 281, 334
Карнеги, институт 54, 83, 109, 134, 162, 165, 209, 256, 262, 334
Кауфман, Стюарт 172
Ках, Линда 230, 231, 233, 335
Кварки 20
Кварц 75, 108, 126, 127, 129, 151, 165
Кемп, Ли 328
Кеннеди, Мартин 268
Кенорленд (Сьюпериа) 226, 227, 242, 265
Кенфилд, Дональд 235, 237, 335
Кеплер, Иоганн 68
Киноварь 242
Китай 221, 229
Клетки 80, 154–156, 158, 161, 163–165, 167, 172, 173, 180,

183, 185, 188, 192, 193, 195, 199, 200, 202, 203, 213, 214, 237, 266, 269, 270, 271
Клинтон, Билл 198
Коди, Джордж 290
Коллинз, Майк 51
Колумбия (Нена, Нуна, Хадсонленд) 228, 229, 231, 241
Кометы 26, 70, 72, 105, 161, 178, 312
Конвекционные ячейки 148, 308
Конвекция, теплообмен 81, 82, 90, 130, 143, 148–150, 220
Конрад, Чарльз 51
Континентальные шельфы 137
Коралловые рифы 66, 285
Корунд 25
Кратоны 222–228, 232, 233, 249, 264
Кремний 21, 23, 25, 27, 74–79, 92, 99, 126, 153, 206, 280
Кэмерон, Аластер 61

Л

Лава 94, 130, 143
Лаврентия, суперкратон 227, 228, 232, 233, 249, 277, 278
Легкий углерод 250
Ледниково-парниковые циклы 272, 273
Ледниковые периоды 264, 295, 300, 301, 309, 321
Лимонен 167
Липиды 162, 182, 218, 259
Литий 15, 20, 99, 126
Лоихи 315
Лоуэлл, Персиваль 106

М

Магеллан 314
Магма 34, 48, 49, 51, 62, 64, 67, 69, 70, 79, 80, 83, 85, 86, 89–96, 98, 110, 113, 119, 121, 126, 130, 148, 149, 160, 179, 219, 225, 319
Магнетит 141
Магний 21, 25, 27, 33, 34, 74, 76–79, 85–87, 91, 92, 99, 104, 121, 152, 153
Магнитное поле 141, 142, 221
Магнитометр 141
Магнитосфера 90
Мадагаскар 226
Мак-Рей, гора, Австралия 203, 212, 213
Малахит 211
Мамонты 301
Мантия 33, 35, 40, 57, 62, 75, 76, 84, 86–92, 96, 100, 110, 113, 114, 116, 126, 135, 146, 148–151, 179, 210, 222, 255, 257, 258, 264, 308, 319
Марганец 180, 266
Маргулис, Линн 269–271, 335
Марокко 30, 32, 282, 325
Марс 27, 40, 106, 108, 110, 125, 127, 153, 161, 194, 211, 231, 239, 306, 313, 314
Матричный синтез 165
Медузы 269, 271, 279
Медь 23, 180
Мейсон, Рональд 143, 144
Менделеев, Димитрий 258
Меркурий 27, 36, 38, 39, 74, 91, 105, 125, 127, 305
Метаболизм 112, 154–156, 162, 166, 173, 255, 294, 296
Метан 24, 102, 123, 180, 196, 247, 255–257, 259–262, 265, 272, 273, 327, 329, 331
Метеориты 26, 28–35, 48, 52, 72, 73, 99, 100, 157, 164, 170, 198

Микроорганизмы 51, 122, 161, 177–183, 185, 192–201, 203–205, 207, 210, 219, 236, 237, 249, 250, 253, 255, 257, 259, 260, 266, 268, 276, 279, 291, 294, 300, 304, 305, 331
Миланкович, Милютин 322
Миллер, Кен 321, 322, 335
Миллер, Стэнли 159, 163, 165, 170
Минеральная эволюция 238
Мировия 234, 248
Молибден 211–213, 237, 249, 266
Молния 117, 157, 159, 309
Муассанит (карборунд) 25
Мышьяк 23

Н

НАСА 38, 51, 53, 105, 107–109, 155, 156, 161, 162, 198, 313
Насекомые 102, 290, 291, 293, 294, 325
Натрий 104, 126
Наутилус, моллюск 298
Нейтронная спектроскопия 109
Нейтронные звезды 259
Нейтроны 20, 55, 107, 188, 320
Неон 21
Нептун 27, 37, 39, 125
Нефть 258, 259
Никель 180
Нитрогеназа 237
Новопангея (Амазия) 306–309
Ноул, Эндрю 208, 230, 237, 288, 335
Ноффке, Нора 204, 205, 207–209, 230, 335
Ньютон, Исаак 134, 188, 189

О

Обезьяны 301
Облака 26, 27, 33, 45, 57, 59, 62, 74, 112, 120, 152, 281, 311, 320
Обратная связь 155, 246–248, 250, 253–257, 268, 327
Обсерватория Дип-Карбон 335
Озоновый слой 297
Окаменелости 13, 134, 179, 182, 196–201, 203, 204, 206–208, 219, 222, 236, 252, 269, 276, 280, 281, 283–285, 287, 289, 294, 300, 315
Окисление 123, 235, 328
Оксигеназа 192
Оксиды азота 196
Олдрин, Базз 51
Оледенение 9, 41, 247, 252, 254, 257, 263–265, 269, 271, 280, 297, 299, 301
Оливин 35, 54, 75, 77, 85–87, 91, 93, 113, 116, 118
Опал 108
Осадочные бассейны 249
Осадочные породы 66, 108, 202, 225, 252

П

Палеомагнетизм 141
Пангея 278, 294, 296, 298, 308
Панталасса 278
Папино, Доминик 266, 267, 334
Папоротник, окаменелости 134, 285
«Первичный бульон» 161
Переходная зона 87, 116
Перидотит 86, 87, 91–95, 126, 128
Перидот (оливин) 77
Период полураспада 191
Перовскит 87
Песчаник 118, 207, 208, 224, 285, 286
Пикеринг, Уильям Генри 132

Пилбара, кратон 202, 203, 223
Пинатубо, гора 316
Пирит 79, 186, 234
Пироксен 54, 77, 86, 91, 93, 113, 116, 118, 127, 165
Плагиоклаз (полевой шпат) 91
Планетезималь 33–35, 37, 47, 49, 56, 60, 73, 150, 219
Плутон 105
Плутоний 23, 33
Позвоночные 299, 332
Полевой шпат 75, 85, 91
Предел Роша 62
Пресс, Франк 284
Приливная волна 69
Приливы 67, 69, 70, 87, 95, 300
Проводимость 148
Пропан 180
Протоземля 47, 60, 61, 116, 219
Протоны 20, 21, 55, 72, 74, 75, 103, 188, 320
Пульсары 258
Пустыни 14, 29, 30, 32, 109, 201, 229, 231, 300, 306, 325

Р

Радиометрическое датирование 142
Разлом Мендосино 144
Раковины, окаменелости 298
Рафф, Артур 143, 144, 147
Реголит 52
Рейнир, гора 146, 231
Рений 212, 213
Рептилии 134, 284, 297
Рихтера шкала 318
Роджерс, Джон 228, 335
Родиния 232, 233, 242, 248, 275, 277
Ртуть 23, 83, 211, 214, 241, 242
Рубен, Сэмюель 191
Рубин 25, 76

С

Саган, Карл 311, 312, 333
Саммонс, Роджер 202–204, 206, 335
Сан-Андреас, разлом 147
Сапфир 25, 76
Сатурн 27, 37–39, 48, 62, 105, 123, 125, 162
Сахара, пустыня 30, 325
Св. Елены, гора 146, 316
Сверженский, Димитрий 334
Сверхновые 16, 24, 72, 99
Свинец 40, 44, 45, 92, 118, 219
Сера 21, 23, 55, 79, 99, 100, 153, 157, 170, 177, 181, 187–190, 213, 234, 235–237, 242, 243
Серебро 23, 99, 219
Силикаты 25, 33–35, 62, 75, 76, 83, 85–89, 91, 92, 98, 113, 118
Силлы 93
Сингулярность 19
Скиапарелли, Джованни 106
Скотт, Генри 256
«Скучный» миллиард 218, 220, 227, 232, 233, 241, 243, 247
Сланец 12, 43, 198, 199, 201–203, 205–207, 212, 213, 224, 236, 283, 286, 288, 289
Слой D 88–90
Слюда 35, 55, 76, 77, 127
Солнечный ветер 27
Срединно-Атлантический хребет 137–140
Стераны 203
Строматолиты 205–207
Сульфат 180, 183, 235, 236
Супервулканы 293, 318, 327
Суперконтиненты 133, 220, 224, 226–229, 231–233, 241, 242, 246, 248, 249, 265, 275, 277, 308, 309

Суперкратон 223, 227
Сьюпириор, кратон 223, 226

Т

Тайлер, Стэнли 206
Талидомид 167
Тантал 126
Тарп, Мари 138
Таупо, вулкан 318
Таурус–Литтров, долина 53
Термопара 114, 115
Тигры 303, 332
Тиллиты 252
Титан 123, 162
Тиут, Марокко, окаменелости 282
Трехвалентное железо 77
Трилобиты 281–283, 285, 287, 294, 296, 298, 300
Тритон 39, 58, 59
Туманности 15, 25
Тунгуска, река 310
Тундра 16, 201, 222

У

Углеводороды 259
Углерод 21, 22, 24, 25, 43, 99, 100, 153, 157, 158, 162, 164, 170–172, 178, 181, 191, 200, 202, 203, 209, 210, 213, 249, 250, 253, 254, 256, 259, 260, 261, 263, 268, 289, 293, 302, 304
Уголь 286, 293
Уильямсон, Дональд 270
Украинский кратон 228
Уксусная кислота 171
Ультрафиолетовое излучение 158
Уорриер, Сантош Мадхава 228
Ур, континент 226–228, 232, 249
Уран, газовый гигант 27, 37, 39, 48, 63, 125
Уранинит 187
Уран, радиоактивный изотоп 23, 44, 45, 80, 99, 118, 126, 187, 211, 214, 219
Уэллс, Герберт 106

Ф

Фаркуар, Джеймс 188, 190, 334
Фобос 48
Фогель, Мэрилин 209, 290
Фораминифера 321
Фосфаты 180, 291
Фосфор 23, 157, 170, 181, 266, 267, 269, 271
Фотосинтез 8, 112, 182, 183, 185, 186, 190–196, 198, 200, 203–206, 213, 214, 250, 254, 266, 299, 311

Х

Хаури, Эрик 109, 115, 335
Хейзен, Маргарет 336
Хейлз, Стивен 191
Хиральность 166, 167
Хлор 99, 104
Хлорофилл 192
Хлорфторуглеводород (фреон) 189
Холмс, Артур 129
Хондриты 28, 32, 35, 100, 150
Хоффман, Пол 252–254, 263, 264
Хром 54, 55, 76

Ц

Церий 187
Цинк 23, 219
Циркон 118–120, 127
Цирконий 35, 99, 118, 127
Цунами 299, 309

Ч

Чемберлен, Роллин Т. 135
Черные дыры 297
Чесапикский залив 41
Чжао, Гохун 228

Ш

Шойбле, Эдвин 260
Шопф, Уильям «Билл» 197–201, 204, 205
Шостак, Джек 175
Шрок, Роберт 283

Э

Эвапориты 108
Эверест, гора 131, 281
Эвклид 11, 147
Эйяфьяллайокудль 317
Электронный микрозонд 55
Эратосфен 11
Эрозия 12, 85, 93, 99, 118, 119, 212, 234, 235, 251, 265
Этанол 83
Эукариоты 203

Ю

Южная Америка 308
Южная Африка 226
Юинг, Морис 334
Юпитер 27, 34, 37, 38, 48, 72, 125, 162
Юри, Гарольд 159, 160

Я

Ядерный синтез, реакции 21
Янг, Эд 260, 261
Япет, океан 308
Япония 111, 145, 228, 256, 308

A

American Mineralogist, журнал 15, 239

D

Der Spiegel, журнал 239

H

Huygens, космический зонд 38

M

Mariner, запуски 106

N

Nature, журнал 199, 203, 235, 239

O

Opportunity, марсоход 108

P

Phoenix, посадочный модуль 107, 108

S

Science, журнал 109, 159, 198, 202, 209, 212, 237, 239, 252, 268
Spirit, марсоход 107, 108

T

The New Scientist, журнал 239

V

Viking, полеты 106, 336

Хейзен Роберт

История Земли

От звездной пыли — к живой планете
Первые 4 500 000 000 лет

Руководитель проекта *И. Серёгина*
Корректоры *Е. Аксенова, М. Миловидова*
Компьютерная верстка *А. Фоминов*
Дизайнер обложки *О. Сидоренко*

Фото на обложке Shutterstock

Подписано в печать 14.10.2019. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Объем 22
печ. л. Тираж 5000 экз. Заказ № .

ООО «Альпина нон-фикшн»
123060, г. Москва
ул. Расплетина, д. 19, офис 2
Тел. (495) 980-5354
www.nonfiction.ru

Знак информационной продукции
(Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.)

0+

Издательство «Альпина нон-фикшн»

Достучаться до небес

Научный взгляд
на устройство Вселенной

Лиза Рэндалл, пер. с англ., 2014, 518 с.

Человечество стоит на пороге нового понимания мира и своего места во Вселенной — считает авторитетный американский ученый, профессор физики Гарвардского университета Лиза Рэндалл, и приглашает нас в увлекательное путешествие по просторам истории научных открытий. Особое место в книге отведено новейшим и самым значимым разработкам в физике элементарных частиц; обстоятельствам создания и принципам действия Большого адронного коллайдера, к которому приковано внимание всего мира; дискуссии между конкурирующими точками зрения на место человека в универсуме. Содержательный и вместе с тем доходчивый рассказ знакомит читателя со свежими научными идеями и достижениями, шаг за шагом приближающими человека к пониманию устройства мироздания.

Мир, полный демонов

Наука — как свеча во тьме

Карл Саган, пер. с англ., 2-е изд., 2015, 537 с.

«Мир, полный демонов» — последняя книга Карла Сагана, астронома, астрофизика и выдающегося популяризатора науки, вышедшая уже после его смерти. Эта книга, посвященная одной из его любимых тем — человеческому разуму и борьбе с псевдонаучной глупостью, — своего рода итог всей его работы. Мифы об Атлантиде и Лемурии, лица на Марсе и встречи с инопланетянами, магия и реинкарнация, ясновидение и снежный человек, креационизм и астрология — Саган последовательно и беспощадно разоблачает мифы, созданные невежеством, страхом и корыстью. Эта книга — манифест скептика, учебник здравого смысла и научного метода. Яркий, глубоко личный текст — не только битва с псевдонаукой, но и удивительная картина становления научного мировоззрения, величайших открытий и подвижников.

По вопросам приобретения этих и других книг обращайтесь по тел. **(495) 980-53-54**
www.nonfiction.ru

Издательство «Альпина нон-фикшн»

Гиперпространство

Научная одиссея через параллельные миры, дыры во времени и десятое измерение

Митио Каку, пер. с англ., 2014, 502 с.

Инстинкт говорит нам, что наш мир трехмерный. Исходя из этого представления, веками строились и научные гипотезы. По мнению выдающегося физика Митио Каку, это такой же предрассудок, каким было убеждение древних египтян в том, что Земля — плоская. Эта книга посвящена теории гиперпространства. Идея многомерности пространства вызывала скепсис, высмеивалась, но теперь признается многими авторитетными учеными. Значение этой теории заключается в том, что она способна объединять все известные физические феномены в поразительно простую конструкцию и привести ученых к так называемой теории всего. Однако серьезной и доступной литературы для неспециалистов почти нет. Этот пробел и восполняет Митио Каку, объясняя с научной точки зрения и происхождение Земли, и существование параллельных вселенных, и путешествия во времени, и многие другие кажущиеся фантастическими явления.

Физика будущего

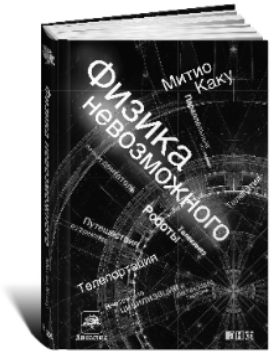
Митио Каку, пер. с англ., 3-е изд., 2014, 584 с.

Кому, как не ученым-физикам, рассуждать о том, что будет представлять собой мир в 2100 году? Как одним усилием воли будут управляться компьютеры, как силой мысли человек сможет двигать предметы, как мы будем подключаться к мировому информационному полю? Возможно ли это? Оказывается, возможно и не такое. Искусственные органы; парящие в воздухе автомобили; невероятная продолжительность жизни и молодости — все эти чудеса не фантастика, а научно обоснованные прогнозы серьезных ученых, интервью с которыми обобщил в своей книге Митио Каку.

По вопросам приобретения этих и других книг обращайтесь по тел. **(495) 980-53-54**

www.nonfiction.ru

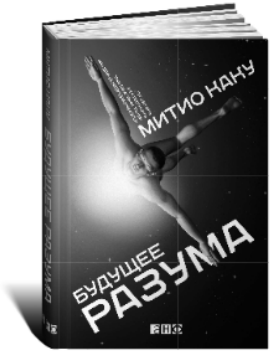
Издательство «Альпина нон-фикшн»



Физика невозможного

Митио Каку, пер. с англ., 5-е изд., 2014, 456 с.

Еще совсем недавно нам трудно было даже вообразить сегодняшний мир привычных вещей. Какие самые смелые прогнозы писателей-фантастов и авторов фильмов о будущем имеют шанс сбыться у нас на глазах? На этот вопрос пытается ответить Митио Каку, американский физик японского происхождения и один из авторов теории струн. Из книги вы узнаете, что уже в XXI веке, возможно, будут реализованы силовые поля, невидимость, чтение мыслей, связь с внеземными цивилизациями и даже телепортация и межзвездные путешествия.



Будущее разума

Как наука пытается понять, улучшить и усилить разум

Митио Каку, пер. с англ., 2015, 504 с.

За последние годы мы узнали о мозге больше, чем за всю предыдущую историю человечества. Начинается золотой век нейробиологии, обязанный своими методами и успехами в первую очередь достижениям современной физики. Недалек тот день, когда можно будет наблюдать в реальном времени работу человеческого мозга и тогда, вполне вероятно, удастся дать точные ответы на важнейшие вопросы философии. Есть ли у человека душа? Возможно ли бессмертие? Какое место человек занимает в великом космическом порядке вещей? Митио Каку, знаменитый физик-теоретик и популяризатор науки, вводит читателя в этот новый удивительный мир — мир нашего «я».

По вопросам приобретения этих и других книг обращайтесь по тел. **(495) 980-53-54**
www.nonfiction.ru

Издательство «Альпина нон-фикшн»

Начало бесконечности

Объяснения, которые меняют мир

Дэвид Дойч, пер. с англ., 2014, 581 с.

Британский физик Дэвид Дойч — не только один из основоположников теории квантовых вычислений, но и философ, стремящийся осмыслить «вечные вопросы» человечества в контексте, заданном развитием науки. Стержневой вопрос данной книги: есть ли предел для человеческого прогресса? Ответ выражен в заглавии: мы стоим у начала бесконечного пути, по которому поведет нас, выдвигая догадки и подвергая их критике, наш универсальный разум. Мы встали на этот путь в эпоху Просвещения, но с него легко сбиться под влиянием ошибочных философских идей, к которым автор причисляет многие течения мысли — от позитивизма до постмодернизма, не говоря уже о религии. Примером отступления от пути разума в науке предстает у него копенгагенская интерпретация квантовой механики. Разумную альтернативу ей Дойч видит в интерпретации Эверетта, из которой вытекает картина мира как мультивселенной.

Программируя Вселенную

Квантовый компьютер и будущее науки

Сет Ллойд, пер. с англ., 2013, 256 с.

Каждый атом Вселенной, а не только различные макроскопические объекты, способен хранить информацию. Акты взаимодействия атомов можно описать как элементарные логические операции, в которых меняют свои значения квантовые биты — элементарные единицы квантовой информации. Парадоксальный, но многообещающий подход Сета Ллойда позволяет элегантно решить вопрос о постоянном усложнении Вселенной: ведь даже случайная и очень короткая программа в ходе своего исполнения на компьютере может дать крайне интересные результаты. Вселенная постоянно обрабатывает информацию — будучи квантовым компьютером огромного размера, она все время вычисляет собственное будущее. И даже такие фундаментальные события, как рождение жизни, половое размножение, появление разума, можно и должно рассматривать как последовательные революции в обработке информации.

По вопросам приобретения этих и других книг обращайтесь по тел. **(495) 980-53-54**

www.nonfiction.ru

Издательство «Альпина нон-фикшн»

Эволюция

Триумф идеи

Карл Циммер, пер. с англ., 3-е изд., 2014, 561 с.

Один из лучших научных журналистов нашего времени со свойственными ему основательностью, доходчивостью и неизменным юмором дает полный обзор теории эволюции Чарльза Дарвина в свете сегодняшних представлений. Что стояло за идеями великого человека, мучительно прокладывающего путь новых знаний в консервативном обществе? Почему по сей день не прекращаются споры о происхождении жизни и человека на Земле? Как биологи-эволюционисты выдвигают и проверяют свои гипотезы и почему категорически не могут согласиться с доводами креационистов? В поисках ответа на эти вопросы читатель делает множество поразительных открытий о жизни животных, птиц и насекомых, заставляющих задуматься о людских нравах и этике, о месте и предназначении человека во Вселенной.

Паразит — царь природы

Тайный мир самых опасных существ на Земле

Карл Циммер, пер. с англ., 2-е изд., 2014, 362 с.

Люди просто не догадываются о том, как сложен и причудлив мир паразитов — опаснейших созданий природы, живущих за счет других, и насколько велика их роль в нашей жизни. Они питаются плотью и кровью своих жертв, влияют на биологическое и социальное поведение целых видов, на численность популяции и направляют в конечном счете эволюцию флоры и фауны. В мире, где каждый кормит своего паразита, порой даже трудно провести грань между им и его жертвой. Нужно ли уничтожать всех паразитов или они — необходимый элемент экологической системы? Карл Циммер, один из лучших научных журналистов нашего времени, делает доступными самые сложные научные теории и описывает жизнь паразитов, как фантастический роман с непостижимыми, зловещими, а порой вызывающими сопереживание героями.

По вопросам приобретения этих и других книг обращайтесь по тел. **(495) 980-53-54**
www.nonfiction.ru